

**UNIwersYTET ŁÓDZKI**  
**WYDZIAŁ NAUK GEOGRAFICZNYCH**

Joanna Szczepańska

*Zmiany reżimu pożarowego wywołane zmianami klimatu  
w XXI wieku na przykładzie Leśnego Kompleksu  
Promocyjnego Lasy Spalsko-Rogowskie.*

Rozprawa doktorska  
napisana pod kierunkiem  
prof. dr hab. Joanna Wibig

Łódź 2017

## **Podziękowania**

*Pragnę serdecznie podziękować mojemu Promotorowi prof. dr hab. Joannie Wibig, za otwartość, życzliwą opiekę i pomoc w przygotowaniu rozprawy doktorskiej.*

*Bardzo dziękuję mojej rodzinie za cierpliwość i wsparcie.*

*Podziękowania należą się również mojemu byłemu pracodawcy Wojewódzkiemu Inspektoratowi Ochrony Środowiska w Łodzi, a w szczególności kierownikowi Ryszardowi Klasowi i dyrektorowi Krzysztofowi Wójcikowi za zrozumienie mojej chęci dalszego kształcenia i zgodę na podjęcie przeze mnie studiów doktoranckich.*

***Niniejsza praca powstała dzięki dzieleniu się wiedzą i danymi.***

*Pragnę bardzo podziękować wszystkim pracownikom Państwowej Straży Pożarnej oraz pracownikom Lasów Państwowych, którzy poświęcili mi swój czas, udostępnili archiwa i dane elektroniczne. Szczególnie cenne były dla mnie rozmowy z Państwem, dzięki którym mogłam zobaczyć problem pożarów leśnych okiem praktyków znających ogień i znających las. Wasze spostrzeżenia są ważną częścią tej pracy.*

*Dziękuję:*

*Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Łodzi*

*Nadleśnictwu Brzeziny*

*Nadleśnictwu Spala*

*Leśnemu Zakładowi Doświadczalnemu w Rogowie Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie*

*Komendzie Wojewódzkiej Państwowej Straży pożarnej w Łodzi*

*Komendzie Miejskiej PSP w Łodzi*

*Komendzie Miejskiej PSP w Skierniewicach*

*Komendzie Miejskiej PSP w Piotrkowie Trybunalskim*

*Komendzie Powiatowej PSP w Brzezinach*

*Komendzie Powiatowej PSP w Koluszkach*

*Komendzie Powiatowej PSP w Łowiczu*

*Komendzie Powiatowej PSP w Rawie Mazowieckiej*

*Komendzie Powiatowej PSP w Tomaszowie Mazowieckim*

*Komendzie Powiatowej PSP w Zgierzu*

*W pracy niezbędne były również dane topograficzne i wektorowe. Serdecznie dziękuję za możliwość skorzystania z danych Centralnego Zasobu Geodezyjno i Kartograficznego Urzędu Geodezji i Kartografii oraz Bazy Danych Topograficznych BDOT10k, Departamentu Geodezji i Kartografii Urzędu Marszałkowskiego Województwa Łódzkiego.*

*Dziękuję Instytutowi Meteorologii i Gospodarki Wodnej za udostępnienie historycznych serii danych meteorologicznych z trzech stacji Łódź- Lublinek, Warszawa-Okęcie i Sulejów dla okresu 25 lat.*

*Dziękuję również twórcą modelu Prometheus za jego darmowe udostępnienie w Internecie wraz z podręcznikiem, raportami i artykułami umożliwiającymi lepsze zrozumienie i skorzystanie z ich kilkudziesięcioletniej pracy.*

*Na koniec pragnę podziękować Międzynarodowemu Zespołom Badawczym pracującym w Programie Badawczym Klimatu Światowego zajmującymi się klimatem regionalnym i modelowaniem sprzężonym (World Climate Research Programme's Working Group on Regional Climate, and the Working Group on Coupled Modelling) koordynowanym przez CORDEX i panel odpowiedzialny dla CMIP5. Dziękuję grupie CLMcom, która przygotowała i udostępniła użyte w pracy dane wyjściowe z modelu scenariuszy klimatycznych, w skład której wchodzi:*

*BTU - Brandenburg University of Technology*

*DWD - Deutscher Wetterdienst*

*ETHZ - Eidgenoessische Technische Hochschule Zurich*

*UCD - Meteorology and Climate Centre, University College Dublin*

*WEGC - Wegener Centre of Climate and Global Change, University of Graz, Austria*

*Dziękuję Federacji -Earth System Grid Federation koordynowanej przez Program Departamentu Energii Stanów Zjednoczonych dla Diagnostyki Modeli Klimatycznych i ich Wzajemnego Porównywania oraz Europejskiej Sieci the European Network for Earth System i innym partnerom w ramach Globalnej Organizacji -Global Organisation for Earth System Science Portals (GO-ESSP) za międzynarodowy wysilek i udostępnienie infrastruktury do badań.*

## **Acknowledgements**

*I would like to thank my Promoter prof. dr hab. Joanna Wibig, for openness, kind care and help in the preparation of the doctoral dissertation.*

*I also thank to my family for patience and support.*

*Thanks are also due to my former employer of the Provincial Inspectorate for Environmental Protection in Łódź, in particular to the head of Ryszard Klas and director Krzysztof Wójcik for understanding my willingness to continue education and agreeing to take up doctoral studies.*

***This work was created thanks to the sharing of knowledge and data.***

*I would like to thank all the employees of the State Fire Service and employees of the State Forests who have given me their time, archives and electronic data. Talks with you were especially valuable for me, thanks to which I could see the problem of forest fires by the eye of practitioners who know the fire and know the forest. Your observations are an important part of this work.*

*Thank you:*

*Regional Directorate of State Forests in Łódź*

*Brzeziny Forest Inspectorate*

*Spała Forest Inspectorate*

*Forestry Experimental Plant in Rogów, Warsaw University of Life Sciences*

*Provincial Headquarters of the State Fire Service in Łódź*

*The Municipal Headquarters of the State Fire Service in Łódź*

*The Municipal Headquarters of the State Fire Service in Skierniewice*

*The Municipal Headquarters of the State Fire Service in Piotrków Trybunalski*

*Powiat Headquarters PSP in Brzeziny*

*Powiat Command PSP in Koluszki*

*Powiat Command PSP in Łowicz*

*Powiat Headquarters PSP in Rawa Mazowiecka*

*Powiat Headquarters PSP in Tomaszów Mazowiecki*

*Powiat Command PSP in Zgierz*

*Topographic and vector data were also necessary in the work. I thank for the opportunity to use the Central Geodetic and Cartographic Resources of the Office of Geodesy and Cartography and the Topographic Data Base BDOT10k, Department of Geodesy and Cartography of the Marshal's Office of the Lodz Voivodship.*

*I would like to thank the Institute of Meteorology and Water Management for providing access to historical meteorological data series from three stations: Łódź-Lublinek, Warszawa-Okęcie and Sulejów for a period of 25 years.*

*I thank to the creators of the Prometheus: the Canadian Wildland Fire Growth Simulation Model - Prometheus Project Steering Committee and Alberta Agriculture and Forestry for its free sharing on the Internet along with a handbook, instructions, reports and articles to better understand and take advantage of their several decades of work.*

*I acknowledge the World Climate Research Programme's Working Group on Regional Climate, and the Working Group on Coupled Modelling, former coordinating body of CORDEX and responsible panel for CMIP5. I also thank the climate modelling groups CLMcom (Climate Model Community):*

*BTU - Brandenburg University of Technology*

*DWD - Deutscher Wetterdienst*

*ETHZ - Eidgenoessische Technische Hochschule Zurich*

*UCD - Meteorology and Climate Centre, University College Dublin*

*WEGC - wegner Centre of Climate and Global Change, University of Graz, Austria*

*for producing and making available their model output.*

*I also acknowledge the Earth System Grid Federation infrastructure an international effort led by the U.S. Department of Energy's Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison, the European Network for Earth System Modelling and other partners in the Global Organisation for Earth System Science Portals (GO-ESSP).*

## Spis treści

1. Wstęp.....	10
2. Wprowadzenie do tematyki badań.....	14
2.1. Cel pracy.....	14
2.2. Charakterystyka obszaru badań.....	16
2.3. Okres badawczy.....	18
3. Reżim pożarowy – stan początkowy analizy .....	19
3.1. Źródła danych o reżimie historycznym.....	19
3.2. Weryfikacja danych historycznych o pożarach.....	21
3.3. Statystyka pożarowa w obszarze badawczym w latach 1989-2013.....	24
3.4. Rozkład przestrzenny pożarów, zróżnicowanie reżimów w lenniectwach.....	28
3.5. Wpływ warunków meteorologicznych na występowanie pożarów.....	35
4. Mapowanie typów paliwa.....	37
4.1. Zmienne wpływające na palność lasu.....	37
4.2. Typy paliwa.....	43
4.3. Typy paliwa w obszarze badawczym.....	50
5. Model pożarowy i jego weryfikacja.....	60
6. Kalibracja źródła zapłonu.....	77
7. Porównanie reżimów pożarowych dla pierwszego i ostatniego dziesięciolecia XXI wieku	82
7.1. Wyniki symulacji.....	86
7.2. Dyskusja.....	88
8. Wnioski.....	93
9. Bibliografia.....	96
Załącznik nr 1. Pożary leśne 1989-2013 oraz wyniki symulacji dla pożarów historycznych	
Załącznik nr 2. Wyniki 100 prób, dla kalibracji źródła zapłonu w różnych typach paliwa	
Załącznik nr 3. Wyniki symulacji dla historycznego okresu próbnego 2001-2010 oraz scenariuszy historycznych dla okresu 2091-2100	

## Spis tabel

Tabela 2.1. Udział drzewostanu jednopiętrowego i głównych gatunków w nadleśnictwach oraz LZD Rogów (K. Fronczak, 2007).

Tabela 3.1. Liczba pożarów i wielkość spalonej powierzchni rocznie w latach 1989-2013

Tabela 3.2. Liczba pożarów i wielkość powierzchni spalonej w obszarze badawczym w zależności od odległości od sieci kolejowej. Dane z lat 1989-2013

Tabela 3.3. Pożary według grup wielkościowych i nadleśnictw. Dane dla okresu 1989-2013

Tabela 3.4. Parametry charakteryzujące reżim pożarowy w leśnictwach w latach 1989-2013

Tabela 3.5. Wskaźniki korelacji Pearsona dla liczby pożarów danego dnia w zależności od warunków meteorologicznych panujących danego dnia

Tabela 4.1. Typy siedlisk występujące na obszarze Leśnego Kompleksu Promocyjnego „Lasy Spalsko Rogowskie” (*Otwarta Encyklopedia Leśna, weryfikacja według danych Nadleśnictw Spała i Brzeziny oraz LZD Rogów*)

Tabela 4.2. Zestawienie typów paliw w LKP Lasy Spalsko Rogowskie z podziałem na poszczególne leśnictwa i LZD Rogów.

Tabela 5.1 Porównanie powierzchni spalonych w czasie pożaru w rzeczywistości i w 2 symulacjach, przeprowadzonych z wyznaczeniem kodu wilgotności paliwa metodą Van Wagnera i Lawsona.

Tabela 5.2 Udział procentowy poszczególnych grup pożarów w symulacji zdarzeń historycznych 1989-2013

Tabela 6.1. Występowanie początków pożarów w okresie historycznym 1989-2013 według typów paliwa.

Tabela 6.2. Pożary wybrane do kalibracji częstotliwości źródła zapłonu; Id- indywidualny identyfikator pożaru

Tabela 6.3 Prawdopodobieństwo wystąpienia pożaru w danym typie paliwa według 100 prób, maksymalnie 24 godzinnych symulacji w programie Prometheus.

Tabela 6.4 Liczba źródeł zapłonów odpowiadająca okresowi 10 lat

Tabela 6.5 Wybór źródeł zapłonu dla paliwa C-4

Tabela 7.1 Średnie wartości dobowych parametrów meteorologicznych oraz średniego rocznego opadu według danych historycznych oraz scenariuszy klimatycznych dla Sulejowa

Tabela 7.2. Liczba pożarów i średnie powierzchnie spalone po czasie 2 i 72 godzin według symulacji przeprowadzonych dla okresu historycznego 2001-2010 oraz dziesięciolecia 2091-2100 według scenariuszy RCP 4.5 i RCP 8.5

Tabela 7.3. Rozkład wielkości pożarów w 10 próbnym okresie historycznym i dla dwóch scenariuszy klimatycznych RCP 4.5 i RCP 8.5

## **Spis map**

Mapa 2.1. Obszar Leśnego Kompleksu Promocyjnego „Lasy Spalsko Rogowskie”

Mapa 3.1. Lokalizacja pożarów leśnych na terenie LKP „Lasy Spalsko-Rogowskie” w latach 1989-2013

Mapa 3.2. Liczba pożarów w leśnictwach obszaru badawczego w latach 1989-2013

Mapa 3.3. Całkowita powierzchnia spalona w leśnictwach obszaru badawczego w latach 1989-2013

Mapa 3.4. Średnia powierzchnia pożaru w leśnictwach, wg danych z lat 1989-2013.

Mapa 3.5. Udział całkowitej powierzchni spalonej do powierzchni leśnictw w latach 1989-2013

Mapa 4.1. Typ siedlisk występujący na obszarze Leśnego Kompleksu Promocyjnego „Lasy Spalsko Rogowskie”(według danych z inwentaryzacji Nadleśnictwa Spała, Nadleśnictwa Brzeziny i LZD Rogów)

Mapa 4.2. Typy paliwa na obszarze LKP Lasy Spalsko Rogowskie

Mapa 5.1. Lokalizacja stacji meteorologicznych

Mapa 5.2. Wyniki 96 godzinnej symulacji pożaru nr 109 (pożar pod Regnami) z wykorzystaniem wyłącznie paliwa znajdującego się na obszarze Leśnego Kompleksu Promocyjnego Lasy Spalsko Rogowskie.

Mapy 5.3. Zadrzewienia PKP widoczne na zdjęciu lotniczym i w postaci warstwy topograficznej

Mapa 5.4. Wyniki 96 godzinnej symulacji pożaru nr 109 (pożar pod Regnami) z dodatkowym wykorzystaniem warstwy zadrzewień PKP.

Mapa 7.1. Porównanie powierzchni spalonych w ciągu 3 dób w symulacjach dla: A – stałego kierunku wiatru w ciągu 24 godzin i B – zmiennego kierunku wiatru w ciągu 24 godzin



Mapa 7.2. Wyniki 72 godzinnej symulacji pożaru 256 dla scenariusza RCP 4.5

Mapa 7.3. Pożar ograniczony przeszkodami liniowymi w postaci dróg. Wyniki 3 dniowej symulacji zapłonu 403 dla scenariusza RCP 8.5

Mapa 7.4. Pożar przekraczający przeszkody liniowe. Wyniki 3 dniowej symulacji zapłonu 248 dla scenariusza RCP 4.5

Mapa 7.5. Pożar ograniczony drzewostanem liściastym. Wyniki 3 dniowej symulacji zapłonu 13 dla scenariusza RCP 8.5

## **Spis rysunków**

Rysunek 3.1. Liczba pożarów i wielkości spalonej powierzchni w obszarze badawczym w latach 1989-2013 w poszczególnych grupach wielkości pożaru

Rysunek 3.2. Zmiany średniej wielkości pożaru w obszarze badawczym w latach 1989-2013

Rysunek 3.3. Rozkład liczby pożarów i spalonej powierzchni w poszczególnych miesiącach w latach 1989-2013

Rysunek 3.4. Długości i maksimum sezonu pożarowego w obszarze badawczym w latach 1989-2013

Rysunek 3.5. Godziny występowania pożarów w obszarze badawczym w latach 1989-2013

Rysunek. 5.1. Oznaczenia typów paliw stosowane w programie Prometheus

Rysunek 5.2. Rozkład liczby pożarów według maksymalnego przedziału intensywności pożaru IF

Rysunek 5.3. Rozkład liczby pożarów według maksymalnego przedziału prędkości rozprzestrzeniania się ROS

## **Spis schematów**

Schemat 4.1. Metodologia przyporządkowania typu paliwa (*zmodyfikowany schemat według D.D.B. Perrakis i in., 2016*)

Schemat 4.2. Metodologia przyporządkowania typu paliwa siedliskom olszowym

## 1. Wstęp

Trudno znaleźć element środowiska, który by w sposób pośredni lub bezpośredni nie zależał od klimatu. Dlatego zmiany klimatu pociągają za sobą szereg modyfikacji w wielu powiązanych z nim systemach, które warto poznać i się do nich przygotować.

Nie ma wątpliwości, że klimat się ociepla. Rośnie średnia temperatura globalna, rosną temperatury maksymalne i minimalne. Wzrost temperatury maksymalnej prowadzi do zwiększenia częstotliwości, intensywności i czasu trwania zjawisk ekstremalnych m.in. upałów, czy huraganów. Zmiany są obserwowane na całym świecie, choć nie są wszędzie równomierne. Ze względu na większą powierzchnię lądów na półkuli północnej zmiany zachodzą tam szybciej niż na półkuli południowej.

W sposób bardzo zróżnicowany zmieniają się opady. W wysokich szerokościach geograficznych wykazują generalną tendencję wzrostową i spadkową w szerokościach podzwrotnikowych. Zmienia się również ich rozkład w ciągu roku. Skróceniu ulega okres z pokrywą śnieżną, poza obszarami, gdzie temperatury są wciąż poniżej zera i zwiększa się opad atmosferyczny w postaci śniegu (*J. Wibig, 2009*).

Jak na to wszystko zareaguje życie na Ziemi? Odpowiedź nie jest prosta. Na pewno będą tu wielcy przegrani i wielcy wygrani. Dla jednych zakresy temperatury i dostępność wody wyjdą poza granice umożliwiające przetrwanie. Dla innych otworzą się nowe możliwości ekspansji. Organizmy będą musiały poradzić sobie również z częstszymi zjawiskami ekstremalnymi. Ekosystemy podlegać będą zmianom, a wraz z nimi zmieniać się będą powiązane z nimi mechanizmy środowiskowe. W sposób pośredni klimat będzie również na nie wpływał modyfikując charakter jednego z ważniejszych elementów kształtujących ekosystemy- ognia.

Relacja klimat- roślinność – pożar to skomplikowana sieć powiązań, w którym wszystkie trzy elementy oddziałuje na siebie nawzajem. Klimat wpływa na skład i zasobność roślinności kontrolując dostępność wody, światła i energii. W krótszej perspektywie czasu determinuje również wartości parametrów meteorologicznych wpływających na stopień uwilgocenia roślinności i jej podatność na zapłon i propagację ognia danego dnia. Z punktu widzenia ognia klimat wpływa na to jakie paliwo rośnie w danym miejscu i w jakim jest stanie.

Roślinność wpływa na klimat w dłuższej perspektywie czasowej. Przekształca atmosferyczny dwutlenek węgla w tlen co w efekcie zmieniło nasz klimat w skali globalnej. Wegetacja decyduje o tym, czy pożar w ogóle jest możliwy. Jako paliwo jest niezbędnym składnikiem pożarów leśnych. Ilość paliwa i jego dystrybucja przestrzenna są głównymi czynnikami przy zapłonie i propagacji ognia (*S. Bajocco i in. 2010*).

Pożar – największy postrach mieszkańców lasu potrafi w krótkim czasie uśmiercić część lub całość organizmów żyjących na danym obszarze. Ma też swoje pozytywne działanie – oczyszcza pole dla gatunków światłolubnych, jest niezbędny dla niektórych nasion do otwarcia i rozwoju, prowadzi swoistą selekcję naturalną gatunków mniej odpornych na ogień, co przystosowuje las do panującego klimatu. Pożary zamieniają zmagazynowany w roślinach węgiel w atmosferyczny dwutlenek węgla i metan, co wzmacnia efekt cieplarniany. Wydzielają również duże ilości ciepła. W okresie 1997-2016 średnia roczna globalna emisja z pożarów wynosiła  $2.2 \times 10^{15}$  gramów węgla na rok, z maksimum w 1997 r. ( $3.0 \text{ Pg C yr}^{-1}$ ) i minimum w 2013 ( $1.8 \text{ Pg C yr}^{-1}$ ) (*G. R. van der Werf i in. 2017*).

By uzmysłwić sobie skalę emisji z pożarów warto odnieść ją do ilości węgla w konkretnych ekosystemach. Przykładowo pożary leśne na Syberii emitują  $\text{CO}_2$  równoważne z 12% rocznej produkcji pierwotnej tych lasów (*A. Ito, 2005*). Ponadto pożary są trzecim po oceanicznych i mineralnych źródłem emisji aerozoli (*W. von Hoyningen-Huene i in. 1998*).

Zniszczenia po pożarze to nie tylko uszkodzenie lub śmierć poszczególnych osobników. Erozja i spływ powierzchniowy mogą wzrosnąć o 2 a nawet 3 rzędy wielkości w wyniku pożarów leśnych, co wpływa na możliwość odtworzenia się wegetacji. Odbudowa spływu do stanu przedpożarowego trwa ok. 5 lat. Wilgotność w ściółce podczas odbudowy może dodatkowo spaść z powodu zwiększonego zapotrzebowania na wodę szybko rosnących roślin (*C. Valeo i in., 2003*). Powierzchnia po pożarze ma inne albedo, co na pewien czas wpłynie na jej bilans energetyczny.

Zmieniamy jeden element układanki – klimat. Jak zmieniają się pozostałe?

Cieplejszy klimat oznacza dłuższy okres wegetacyjny. Ale to czy będzie prowadzić do rozwoju roślinności będzie zależeć od odstępności wody i składników odżywczych. Badania z zastosowaniem modeli wegetacyjnych pokazują, że produktywność pierwotna roślin NPP

(Net Primary Production) może wzrosnąć w Europie pod wpływem zachodzących zmian (wzrostu temperatury i stężenia CO<sub>2</sub> w atmosferze) od 25 do 75%, choć nie jest ustalone, czy wystarczy na to składników odżywczych w glebie. Jednak podczas lat, w których występować będzie susza NPP może spaść poniżej wartości obserwowanej dzisiaj, nawet gdy w symulacjach uwzględniony jest efekt nawożenia CO<sub>2</sub>. (*M. Dury i in. 2010*).

Cieplejszy klimat oznacza również nowe gatunki inwazyjne roślinności oraz lepsze warunki dla owadów żywiących się tkankami drzew. Ma to znaczenie dla ich palności, gdyż drzewa są szczególnie podatne na pożar po inwazji owadów (*C. R. Nitschke i in. 2008*).

Podatność ekosystemów leśnych na nowe zakłócenia będzie zależała od wielu czynników. Generalnie im większa bioróżnorodność gatunkowa i wiekowa tym większa odporność na stres (*F. Olsson i in. 2010, P. Bodin i in. 2007*). Starsze drzewa są bardziej odporne na zmiany klimatyczne i na pożar (*Hong S. He i in. 2002, R.M. Roman-Cuesta i in. 2009*).

Niektóre zakłócenia będą mieć charakter incydentalny, inne będą trwać, bądź często się powtarzać. Wegetacja odpowiada na warunki, które trwają przez dłuższy czas. Fluktuacje roczne mogą nie odzwierciedlać dłuższych tendencji (*Tang, S.L. Shafer i in. 2009*).

Reżim pożarowy odpowie zarówno na zmiany klimatyczne jak i zmiany wywołane w wegetacji. Jeśli coraz częstsze będą okresy suszy, lasy będą bardziej podatne na ogień, ale też będą słabiej przyrastać, co ograniczy ilość paliwa i może prowadzić do utraty jego ciągłości (*A.E. Hessel i in. 2011, S. Matthews i in. 2012*). Jeśli opady wzrosną będą niwelować wpływ wzrostu temperatury na wegetację. Wiele badań pokazuje, iż lata z dużymi opadami poprzedzają duże pożary, gdyż sprzyjają przyrostowi biomasy. (*E. Q. Margolis i in. 2009*). Niektórzy badacze wskazują na szczególne znaczenie opadów od stycznia do kwietnia, które mają wpływ na silny przyrost na wiosnę i akumulację paliwa. Jeśli po intensywnych opadach w okresie zimowo wiosennym nadchodzi letnia susza, pożary są bardzo intensywne. Szybsza regeneracja roślinności w bardziej produktywnych warunkach sprzyja krótszym interwałom pożarowym, bo las się szybko odtwarza (*M.G. Pereira i in. 2005, M. A. Huerta i in. 2009, A. Linstadter i in. 2010, A. N. Nunes i in. 2012*). Reakcja na zmiany warunków wilgotnościowych nie będzie mieć charakteru uniwersalnego. Częstsze susze będą wpływały na roślinność i reżim pożarowy silniej w ekosystemach obecnie wilgotnych. Na terenach przyzwyczajonych do suchych warunków wegetacja jest rzadsza i odporniejsza, przez co ma zarówno mniejszy ładunek dostępnego paliwa i mniejszą ciągłość (*J.G. Pausas i in. 2012*).

Na reżim pożarowy wpływ będzie mieć nie tylko ilość ale i skład gatunkowy roślinności. Nowe warunki klimatyczne spowodują wzmożoną selekcję zdolności przystosowawczych drzew. Pojawia się też gatunki inwazyjne, świetnie radzące sobie w nowych warunkach. Czasami pojawienie się jednego gatunku może znacząco zmienić reżim pożarowy (C. Whitlock i in. 2003).

Zmiana klimatu wpłynie również na częstotliwość naturalnych źródeł zapłonu. Ciepłejsze powietrze będzie w stanie magazynować większą ilość wilgoci, przez co liczba burz z wyładowaniami atmosferycznymi może wzrosnąć. Ale obecnie źródła naturalne mają znikomy udział w pożarach leśnych. Ponad 90% pożarów jest zaprządzanych przez człowieka (N. Kodandapani i in. 2008, A. Aldersley i in. 2011, S. Kloster, 2012).

Pożary będą zwiększać presję na wegetację oraz przyczyniać się do intensyfikacji ocieplenia klimatu. Mogą być poważnym mechanizmem zwrotnym wpływającym na tempo i rozmiar zmian klimatycznych (P.Y. Groisman i in. 2007). Mogą być katalizatorem zmian biosfery, przyspieszać zmiany w wegetacji prowadząc do nowego stanu równowagi w nowym klimacie, jak czyniły to w przeszłości. Przyszły reżim pożarowy stanowi dodatkowe źródło niepewności w scenariuszach zmian klimatu. (M.D. Flannigan i in. 2000, J. M. Lenihan i in. 2008).

Jakie ma to znaczenie w Polsce? Według statystyk mamy jeden z wyższych wskaźników zagrożenia środowiska leśnego w Europie. W latach 2000-2008 Polska zajmowała pierwsze, drugie lub trzecie miejsce pod względem liczby powstających pożarów za Portugalią i Hiszpanią oraz miejsce pomiędzy szóstym i dziewiątym pod względem spalonej powierzchni na naszym kontynencie (A. Prędecka, 2011). Jest to więc duży problem, który w wyniku nadchodzących zmian klimatycznych może się nasilić. Warto zbadać to zagrożenie i się na nie przygotować, by jak najlepiej ochronić nasze dziedzictwo przyrodnicze.

## **2. Wprowadzenie do tematyki badań**

Pożar leśny jest naturalnym zjawiskiem. Występuje przy dostępności suchego paliwa i źródła zapłonu. Jest z jednej strony wielkim zagrożeniem życia, żywiołem o dużej sile niszczenia, mogącym na długo zmieniać całe krajobrazy. Z drugiej strony jest zjawiskiem, które do pewnego stopnia może stymulować przyrodę, zapewniać jej odnowę i przystosowanie składu gatunkowego do panujących warunków klimatycznych. Jako pojedyncze zdarzenie ma charakter przypadkowy. W większym zbiorze pożarów występujących na danym obszarze można już zaobserwować pewne prawidłowości rządzące ich częstotliwością, wielkością i ostrością.

Reżim pożarowy obejmuje kompleks zjawisk związanych z występowaniem pożarów na danym terenie, ogólnym wzorem, jaki tworzą w przestrzeni i czasie. Reżim to zjawisko dynamiczne, ewoluujące pod wpływem szeregu czynników tj. zmian w składzie gatunkowym czy wiekowym, zmian warunków klimatycznych i zmian presji oraz dostępności źródła zapłonu.

Ze względu na zmienność, opis reżimu pożarowego dotyczy określonego przedziału czasu. W sposób ilościowy można go scharakteryzować za pomocą szeregu wskaźników:

1. Średniej rocznej liczby pożarów; częstotliwości lub długości interwałów pomiędzy pożarami
2. Wielkości spalonej powierzchni rocznie w hektarach lub procenta spalonej powierzchni w stosunku do wielkości całego obszaru
3. Rozkładu częstotliwości w funkcji wielkości pożaru
4. Sezonowości występowania pożarów w cyklu rocznym, początku i końca występowania sezonu pożarowego, jego długości i cech maksimum rocznego
5. Ostrości pożarów – ich piętrowości i prędkości rozprzestrzeniania

### **2.1. Cel pracy**

Celem pracy jest zbadanie czy współczesne ocieplenie klimatu ma wpływ na reżim pożarowy na przykładzie Leśnego Kompleksu Promocyjnego Lasy Spalsko-Rogowskie.

Cele szczegółowe:

1. Zbadanie, w jaki sposób będzie zmieniać się reżim pożarowy w różnych scenariuszach zmian klimatycznych w XXI wieku w Kompleksie Leśno Promocyjnym „Lasy Spalsko-Rogowskie”. Jak zmieni się częstotliwość pożarów oraz ich rozkład w funkcji wielkości spalonej powierzchni?
2. Ilościowe porównanie reżimów pożarowych przewidywanych przez dwa różne scenariusze klimatyczne.
3. Ustalenie czynników wpływających na palność lasów kompleksu
4. Weryfikacja kanadyjskiego modelu Prometheus pod względem jego przydatności do badań reżimu pożarowego w polskich warunkach
5. Ustalenie sposobu klasyfikacji drzewostanów występujących w Polsce jako paliwo i dane wejściowe do modelu Prometheus

W rozdziale III przeanalizowany zostanie obecny reżim pożarowy na podstawie danych historycznych z okresu 1989-2013. Przygotowanie danych wejściowych – typów paliwa leśnego do modelu Prometheus, służącego do symulowania pożarów w danych warunkach meteorologicznych zostanie omówione w rozdziale IV. W rozdziale tym zostanie opisany schemat klasyfikujący polskie drzewostany do kanadyjskich typów uwzględniający skład wiekowy, gatunkowy, gęstość lasu i wilgotność siedliska.

Model Prometheus zostanie najpierw zweryfikowany na przykładzie danych o pożarach historycznych (rozdział V). Badana będzie zgodność symulacji z rzeczywistymi pożarami, zidentyfikowane zostaną ograniczenia modelu i elementy wpływające na rozbieżności.

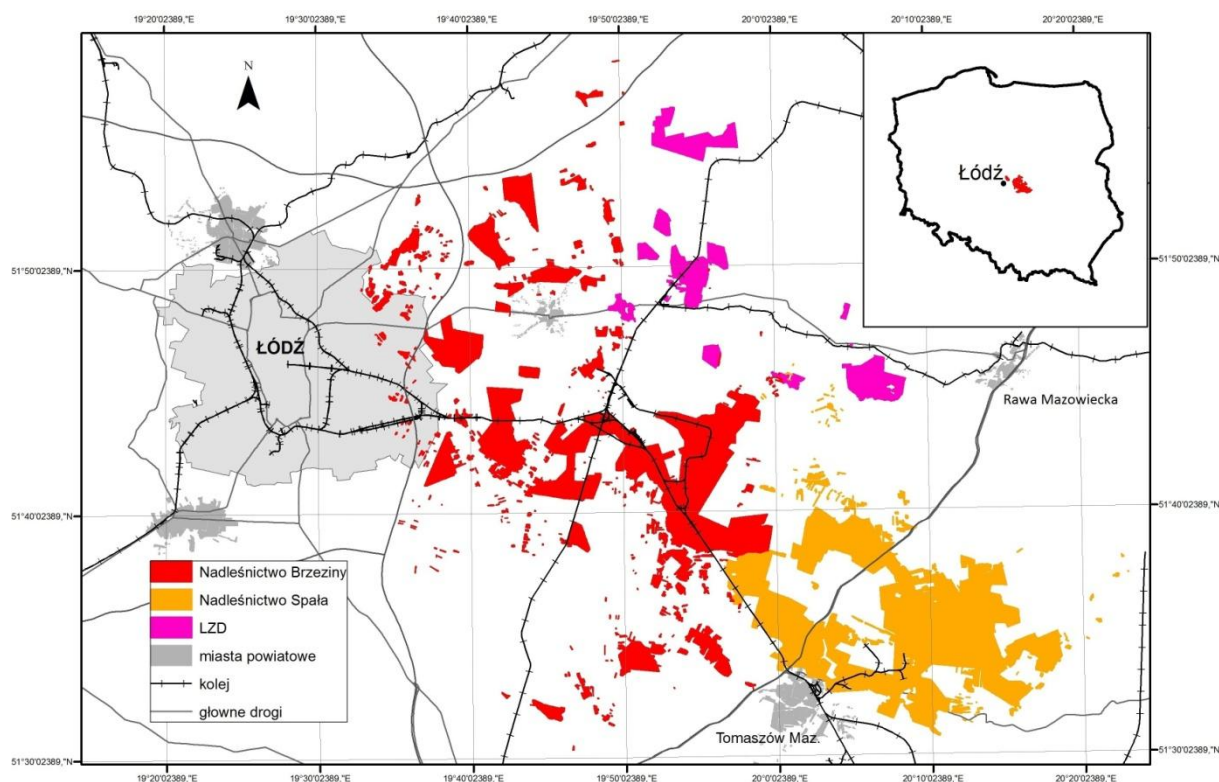
W rozdziale VI, z pomocą programu Prometheus będzie określona częstotliwość zapłonu, jego rozkład czasowy i przestrzenny. Dla losowo wybranych lokalizacji pożarów we wszystkich głównych typach paliwa zostanie na podstawie 100 prób ustalone prawdopodobieństwo powstania pożaru dla również losowo wybranych warunków meteorologicznych z sezonu pożarowego.

W rozdziale VII, korzystając z wyznaczonego schematu źródła zapłonu przeprowadzone będą trzy serie symulacji w okresach dziesięcioletnich: w pierwszym dziesięcioleciu XXI wieku, według meteorologicznych danych historycznych oraz w dziesięcioleciu 2091-2100 dla dwóch scenariuszy klimatycznych RCP 4.5 i RCP 8.5

Analizie poddane zostaną uzyskane w trzech seriach liczby pożarów, średnie powierzchnie spalone i rozkład pożarów w zależności od wielkości spalonej w nich powierzchni.

## 2.2. Charakterystyka obszaru badań

Badania wpływu prognozowanych zmian klimatu na reżim pożarowy przeprowadzone zostały dla obszaru Leśnego Kompleksu Promocyjnego (dalej LKP) „Lasy Spalsko-Rogowskie”. Jest to kompleks powstały w województwie łódzkim 2002 r., w skład którego wchodzi lasy należące do nadleśnictwa Spała, nadleśnictwa Brzeziny oraz lasy należące do Leśnego Zakładu Doświadczalnego w Rogowie Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Geograficznie obszar badawczy stanowią lasy państwowe leżące pomiędzy miastami Łódź, Tomaszów Mazowiecki i Rawa Mazowiecka. Powierzchnia całkowita obszaru wynosi 33 667 ha, w tym 15 542 ha należy do Nadleśnictwa Spała, 14 434 ha do Nadleśnictwa Brzeziny. Pozostała część znajduje się pod opieką Leśnego Zakładu Doświadczalnego (dalej LZD) „Rogów” (K. Fronczak, 2007).



Mapa 2.1. Obszar Leśnego Kompleksu Promocyjnego „Lasy Spalsko Rogowskie”

LKP „Lasy Spalsko Rogowskie” stanowi zbiór zwartych obszarów leśnych poprzedzielanych terenami rolniczymi, zabudową, wodami powierzchniowymi, siecią dróg samochodowych i torów kolejowych. Obszar został wyodrębniony jako system cennych



ekosystemów leśnych istotnych dla krajobrazu, w którym występują i pełniący w nim określone funkcje przyrodnicze. Dyrektor Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych tworzy dla obszaru jednolity program gospodarczo-ochronny, łączący trwale zrównoważoną gospodarkę leśną z aktywnymi formami ochrony przyrody. LKP pełni funkcje ekologiczną i społeczną oraz umożliwia gospodarcze pozyskiwanie drewna. Ma za zadanie propagowanie w gospodarce leśnej proekologicznych technologii oraz edukację przyrodniczo-leśną społeczeństwa. Wszelkie działania na terenie obszaru są inicjowane i oceniane przez powołaną dla kompleksu radę naukowo społeczną. LKP nie ma oddzielnego organu administracyjnego. Zarządzanie obszarem odbywa się w należących do niego nadleśnictwach (K. Fronczak, 2007).

Pod względem przyrodniczym LKP „Lasy Spalsko-Rogowskie” stanowi cenny zbiór wielu unikatowych siedlisk. Kompleks zawiera fragmenty dawnej Puszczy Pilickiej i Lasów Brzezińsko-Rogowskich. Ponad połowę obszaru stanowią parki krajobrazowe - Park Krajobrazowy Wzniesień Łódzkich i Spalski Park Krajobrazowy, oraz 17 rezerwatów przyrody. W parkach krajobrazowych zachowały się 22 gatunki roślin chronionych, liczne gatunki rzadkich owadów, płazów, gadów i ssaków. Lasy ochronne zajmują 62,6% powierzchni LKP, a obszary chronionego krajobrazu 8% (Lasy Państwowe).

Tabela 2.1. Udział drzewostanu jednopiętrowego i głównych gatunków w nadleśnictwach oraz LZD Rogów (K. Fronczak, 2007).

Obszar	Nadleśnictwo Spala	Nadleśnictwo Brzeziny	LZD Rogów
<b>Udział drzewostanu jednopiętrowego [%]</b>	90	76	71
<b>Gatunek*</b>	<b>Udział procentowy gatunku w drzewostanie</b>		
<b>Sosna</b>	90	82	76
<b>Olsza</b>	4		3,6
<b>Dąb</b>	3,2	6	14
<b>Brzoza</b>	2,4	4	
<b>Buk</b>		3	2,2
<b>Jodła</b>		1,9	
<b>Modrzew</b>			1,7

\*Pozostałe gatunki: świerk, grab, topola i inne mają już niewielkie znaczenie. Ich udział nie przekracza 1%

Przez Rogowskie lasy przebiega granica naturalnego zasięgu trzech gatunków lasotwórczych: jodły, buka i świerka. Gatunkiem dominującym w obszarze jest sosna. Znaczące gatunki w poszczególnych nadleśnictwach przedstawia tabela 2.1. Ze względu na

gospodarczy charakter lasów w przeszłości na większości obszaru występuje drzewostan jednopiętrowy.

Najmniej zróżnicowanym elementem obszaru jest nadleśnictwo Spalskie, w którym znaczna część drzewostanu ma charakter nasadzeniowych, jednopiętrowych monokultur o podobnej strukturze wiekowej.

Wiek drzewostanów waha się do kilkuletnich nasadzeń do 200 letnich okazów w najcenniejszych częściach lasu. W obszarze LKP „Lasy Spalsko Rogowskie” 868 drzew ma status pomników przyrody (K. Fronczak, 2007). Poszczególne leśnictwa obszaru różnią się również nasileniem antropopresji. Północno-zachodnia część obszaru znajduje się w bliskim sąsiedztwie aglomeracji łódzkiej. Wiąże się to z gęstą siecią drogową przecinającą obszary leśne. Dodatkowo w tej części obszaru zintensyfikowany jest transport kolejowy. Od strony południowej – nadleśnictwa Spała na obszar wpływa bliskie sąsiedztwo miasta Tomaszów Mazowiecki. Warto również podkreślić, że pewne miejsca obszaru badawczego są bardziej atrakcyjne turystycznie, co wiąże się ze zróżnicowaną presją rekreacyjno – turystyczną mającą duży wpływ na możliwość wystąpienia źródeł zapłonu w lesie.

Różnice wynikające z nawet drobnej zmiany gatunkowej, występowanie drzewostanów w różnych klasach wiekowych, specyficzny charakter presji antropogenicznych powodujących z jednej strony większe ryzyko zapłonu, z drugiej szybką detekcję i reakcję systemu przeciwpożarowego doprowadziło do powstania całej mozaiki reżimów pożarowych w obszarze badawczym. Z przyczyn praktycznych reżimy ustalono dla całego obszaru oraz dla poszczególnych leśnictw, stanowiących odrębne jednostki administracyjne lasu, wydzielone na podstawie swojej względnej jednorodności.

W całym okresie badawczym założono stałość gatunkową i wiekową. Jest to uproszczenie motywowane dużą niepewnością modeli wegetacyjnych. Poza tym aktywne działania leśników polegające na nasadzeniach, pielęgnacji i wycince określonych grup wiekowych i gatunkowych drzew utrzymują względną stałość kompleksów leśnych.

### **2.3. Okres badawczy**

Zmiany reżimu pożarowego w XXI wieku analizowane będą dla lat 2040-50 oraz 2090-2100. Zmiany określane będą względem stanu początkowego określonego dla

okresu 1989-2013. Jak wskazują poprzednie badania częstotliwości pożarów w Polsce dane sprzed 1989 r. są niehomogeniczne z danymi późniejszymi (K. Kozuchowski i in., 2008). Wynika to z innego sposobu raportowania i gromadzenia danych o pożarach. Starsze dane trudniej pozyskać. Wiele materiałów archiwalnych z tamtego okresu się nie zachowało. Po 1989 r. wzrosła raportowalność pożarów. Niepełne statystyki sprzed 1989 r. mogą doprowadzić do mylnych wniosków i znacząco zaniżyć zagrożenie pożarowe w lasach.

### **3. Reżim pożarowy - stan początkowy analizy**

#### **3.1. Źródła danych o reżimie historycznym**

Dane o pożarach pozyskano z dwóch uzupełniających się źródeł: zarządzających kompleksami leśnymi nadleśnictw i LZD Rogów oraz od odpowiadających im terytorialnie komendom powiatowych straży pożarnej (dalej KPS).

Zarządzający lasami udostępnili dane z następujących okresów:

1. Nadleśnictwo Brzeziny – dane z lat 2003-2013
2. Nadleśnictwo Spała 1987-2013
3. Leśny Zakład Doświadczalny w Rogowie– 1992, 2000-2013

Z danych powiatowych komend straży pożarnej skorzystano by uzupełnić luki czasowe w danych pochodzących od zarządzających lasami. Porównanie danych uzyskanych z straży pożarnej wykazało również dużą liczbę pożarów na terenie lasów państwowych nie odnotowanych w statystyce leśnej. Związane jest to z brakiem obowiązku raportowania pożarów ugaszonych przez straż pożarną do nadleśnictw.

Dane o pożarach leśnych z gmin, na obszarze których znajdują się lasy LKP uzyskano z komend powiatowych straży pożarnej z lat:

1. KPS Łódź (miasto Łódź) 2002-2013; brak dostępu do danych archiwalnych z lat 1989-2001
2. KPS Brzeziny (dane dla gmin: Brzeziny gm. wiejska, Brzeziny gm. miejska, Rogów, Jeżów, Dmosin) 1989-2013
3. KPS Koluszki (dane dla gmin: Nowosolna, Andrespol, Koluszki, Brójce) 1989-2013

4. KPS Łowicz (Łyszkowice)1999-2013, w 2010 i 2013 nie było pożarów leśnych w gminach ; brakuje lat 1989-1998 z powodu braku dokumentów archiwalnych
5. KPS Piotrków (Moszczenica, Wolbórz)1989-2013
6. KPS Skierniewice (Lipce Reymontowskie, Głuchów)1999-2013
7. KPS Rawa Mazowiecka 1991-1997; w pozostałych latach nie było pożarów leśnych w gminach – dane dla gmin leżących obecnie w pow. skierniewickim
8. KPS Tomaszów (Rokiciny, Będków, Ujazd, Budziszewice, Żechlinek, Lubochnia, Czerniewice, Tomaszów Mazowiecki gmina, Inowłódz, Rzeczyca) 1989 – 2013
9. KPS Zgierz (Stryków, gm. wiejska Głowno)1991-92, 1994-96, 2000-2012; w 2013 r. nie było pożarów leśnych w gminach; dla pozostałych lat brak dokumentacji

Należy pamiętać, że w okresie 1989-2013 zmianie ulegały granice leśnictw i nadleśnictw. Zmienił się również podział administracyjny w Polsce, w wyniku czego zmianie uległy obszary podlegające poszczególnym komendom straży pożarnej. Z tego względu informacje o pożarach leśnych pozyskiwane były również od komend, nie leżących obecnie w zasięgu obszaru badawczego, ale posiadających materiały archiwalne tego obszaru się dotyczące.

Na potrzeby analizy pozyskano również dane meteorologiczne dotyczące rozpatrywanego okresu historycznych danych o pożarach. Dane meteorologiczne dla trzech stacji: Sulejów, Łódź–Lublinek i Warszawa-Okęcie dostarczył Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Są to godzinne wartości temperatury, wilgotności względnej, prędkości i kierunku wiatru oraz dobowe sumy opadu.

Dane przestrzenne w postaci warstw obszaru Leśnego Kompleksu Promocyjnego z opisem taksacyjnym dostarczyły Lasy Państwowe oraz LZD Rogów.

### **3.2. Weryfikacja danych historycznych o pożarach**

Weryfikacja danych historycznych o pożarach odbyła się dwuetapowo. W pierwszym etapie w celu uniknięcia podwójnego liczenia zdarzeń pochodzących z różnych baz danych połączono raporty z różnych źródeł opisujące te same pożary.

Po uporządkowaniu wszystkich meldunków chronologicznie zidentyfikowano i połączono raporty opisujące ten sam pożar według następujących zasad:

1. Łączono pożary posiadające tę samą lokalizację, datę i godzinę trwania oraz porównywalną powierzchnię spaloną – co najmniej ten sam rząd wielkości. Za zwyczaj szacunki spalonej powierzchni różniły się w obu źródłach.
2. W przypadku rozbieżności danych o powierzchni spalonej za obowiązujące przyjmowano ustalenia leśników

W przypadku dużych pożarów lub pożarów leżących na granicy dwóch powiatów w gaszeniu uczestniczyły wozy z kilku powiatowych straży pożarnych, w skrajnych przypadkach dane o tym samym pożarze raportowane były przez nadleśnictwo i trzy różne KPSy. Porównując w takich przypadkach godziny trwania pożaru za ważniejszą przyjęto godzinę jego zakończenia, gdyż asysty mogą być opóźnione. Spośród wszystkich pożarów zakwalifikowanych do analizy, 41% zostało potwierdzonych przez więcej niż jedno źródło. Powierzchnia raportowana przez straż pożarną często powiększana była o sąsiadujące uprawy, nieużytki lub lasy prywatne, które również ulegały spaleni. Odliczano od powierzchni spalonej tereny leżące poza obszarem badawczym.

W drugim etapie weryfikacji ustalano dokładną lokalizację pożarów według adresu i informacji dodatkowych zawartych w raportach. Na tej podstawie ustalano współrzędne topograficzne pożaru i jego położenie względem obszaru badawczego. W ten sposób spośród 2720 pożarów leśnych z okresu 1989-2013 mających miejsce się na obszarze gmin, na których leży KLP „Lasy Spalsko-Rogowskie” zidentyfikowano 675 pożary leżące w obszarze badawczym.

W obszarze badawczym znalazły się wszystkie pożary raportowane przez służby leśne. Do analizy przyjęto również znaczną liczbę pożarów nie odnotowanych przez to źródło. Jest to związane z koniecznością uzupełnienia 14 letniej luki czasowej w danych nadleśnictwa Brzeziny oraz luk czasowych LZD Rogów. Ponadto do analizy przejęto również

pożary raportowane tylko przez straż pożarną, pochodzące z okresu, dla którego istnieje statystyka leśna, a które według adresu miały miejsce w obszarze badawczym.

By uniknąć dodawania pożarów spoza obszaru badań, lasów prywatnych sąsiadujących z obszarem, kierowano się następującymi zasadami:

1. Pożary nie posiadające raportu w nadleśnictwach włączane były do statystyki pożarowej gdy lokalizacja wskazywała położenie wewnątrz KLP i straż wskazywała nadleśnictwo jako właściciela palącego się lasu.
2. Raporty, w których nie określono właściciela włączane były do statystyki, gdy ich położenie bez wątpliwości wskazywało na obszar badawczy, np. gdy znajdowały się w miejscowości otoczonej przez Lasy Państwowe tj. Konewka gm. Inowódz.
3. W przypadku, gdy w danej miejscowości raportowanych było wiele pożarów, a struktura własnościowa lasów była mieszana przypisywano Lasom Państwowym liczbę pożarów proporcjonalną do ich udziału w ogólnej powierzchni lasów.
4. Pożary przypisywane były do obszaru badawczego, gdy ich duża powierzchnia spalona wykluczała małe lasy prywatne znajdujące się w otoczeniu. Dotyczy to głównie pożarów z lat dziewięćdziesiątych, dla których brak jest danych z nadleśnictwa Brzeziny. W przypadku innych okresów i innych obszarów, jeśli nie było dodatkowych przesłanek, że pożar miał miejsce na obszarze badawczym, wykluczano go ze statystyki, gdyż jest mało prawdopodobne, by zarządzający lasem nie mieli informacji o takim zajściu.

Oprócz adresu przy lokalizowaniu pożaru kierowano się dodatkowymi informacjami zawartymi w raporcie. Wykorzystywano uwagi typu: „przy torach”, „przy drodze szybkiego ruchu”, „wewnątrz lasu”. Posługiwano się również wiekiem drzewostanu. Dodatkową informacją była wielkość spalonej powierzchni. Mały pożar może świadczyć o szybkiej detekcji i reakcji, co za tym idzie o dużej bliskości osiedli ludzkich. Dlatego pożary o małej powierzchni lokalizowane były za zwyczaj na brzegu lasu blisko dróg, zabudowy lub pól uprawnych.

Dane dostarczone przez nadleśnictwo Brzeziny posiadały przypisane współrzędne topograficzne, które po sprawdzeniu z deklarowanymi adresami leśnymi przyjęto do analizy.

Różnice w statystykach zarządzających lasem i powiatowych komend straży pożarnej wiążą się z odmiennym charakterem i obowiązkami obu podmiotów. Leśnicy mają obowiązek informować straż o każdym pożarze, nawet ugaszonym siłami własnymi. Obowiązek ten nie jest wzajemny. Na to nakłada się mniejsze rozeznanie w strukturze własnościowej lasów przez straż, związane z jej mozaikowością i zmiennością w czasie. Dodatkowo te same pożary różnią się w opisie w obu źródłach. Pożar wieloogniskowy czasami traktowany jest jako jeden pożar, czasami jako kilka oddzielnych. W analizie szczegółowo rozważano każdy taki przypadek i rozbijano pożar na mniejsze, jeśli usprawiedliwiała to duża odległość między źródłami zapłonu lub różnica w czasie zapłonu. Analogicznie potraktowano pożary na pogorzeliiskach. Gdy nie było żadnej dodatkowej spalonej powierzchni a pożar był wzniecany w krótkim czasie po zagaszeniu poprzedniego zdarzenie zostało potraktowane w statystyce jako 1 pożar.

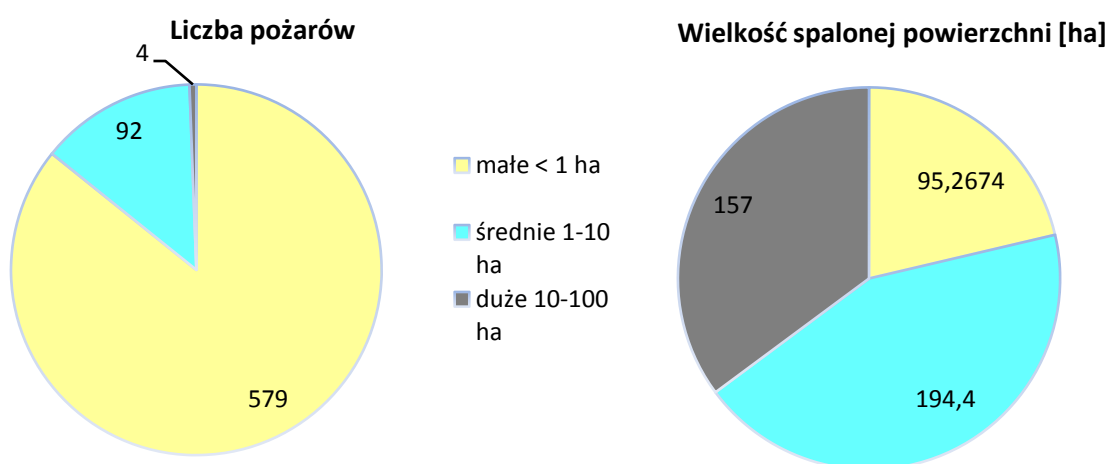
Ujednolicano również czas trwania pożaru. W sytuacji gdy godziny trwania pożaru wg straży były inne niż w nadleśnictwach, jako początek uznawano najwcześniejszą, a jako koniec najpóźniejszą podawaną godzinę. Rozbieżności w raportach dotyczą również domniemanej przyczyny powstania pożaru. W zdecydowanej większości przypadków przeważa przyczyna ludzka opisywana jako nieumyślne zaproszenie, iskry z pojazdów lub infrastruktury elektrycznej, podpalenia, pozostawienia niedopałków lub ognisk bez dozoru, wypalanie traw. Tą prawidłowość potwierdza szereg danych literaturowych. Szacuje się, że obecnie ponad 80% pożarów spowodowanych jest działalnością człowieka (*B. Ubysz i in.*). W danych z nadleśnictw i straży pożarnej pojawiają się różnice w szczegółowym ustaleniu przyczyny pożaru. Stwierdzenie umyślnego podpalenia wiąże się z koniecznością przeprowadzenia dodatkowego dochodzenia i angażowania w sprawę policji. Termin ten był oszczędniej wykorzystywany przez powiatowe komendy straży pożarnej. Zaklasyfikowanie przyczyny pożaru jako podpalenie było w analizie dodatkowym argumentem za zlokalizowaniem pożaru na terenach prywatnych. Podpalenia zdarzają się częściej w lasach prywatnych ze względu na więcej możliwych motywów podpalenia: chęć zmiany struktury użytkowej ziemi, zemsta itp. W okresie 1989-2013 widać wyraźny spadek umyślnych podpałów, co jest wynikiem współpracy leśników zarówno z okolicznymi mieszkańcami jak i organami ścigania.

Szczegółowe zestawienie pożarów leśnych w obszarze badawczym w okresie 1989-2013 zawiera załącznik nr 1.

### 3.3. Statystyka pożarowa w obszarze badawczym w latach 1989-2013

W okresie 1989-2013 w Leśnym Kompleksie promocyjnym „Lasy Spalsko-Rogowskie” miały miejsce 673 pożary, w których spaliło się łącznie 446,67 ha.

Dominują pożary małe, o wielkości spalonej powierzchni do 1 ha. Stanowią one ponad 85,8 % wszystkich pożarów. Pożary średnie o rozmiarze od 1 do 10 ha to niespełna 13,6%. Najmniej liczną grupę stanowią pożary duże o rozmiarze od 10 do 100 ha. W okresie 1989-2013 było ich zaledwie 4, ale spaliło się w nich ponad 35,1% całkowitej powierzchni spalanej.



Rysunek 3.1. Liczba pożarów i wielkości spalonej powierzchni w obszarze badawczym w latach 1989-2013 w poszczególnych grupach wielkości pożaru

Największy pożar w analizowanym okresie pochłonął 100 ha w ciągu 3 dni. Był to jeden z większych pożarów leśnych w Polsce. Miał miejsce 29 sierpnia 1992 r. Leśnicy nadali mu nazwę własną: „Pożar pod Regnami”. Strażacy określają go jako „Górniak”. Był to pożar piętrowy spowodowany nieumyślnym zaproszeniem ognia i długotrwałą suszą. O jego rozprzestrzenieniu zadecydował błąd ludzki w początkowych fazach pożaru, polegający na niedoszacowaniu prędkości i możliwości objęcia zasięgiem sąsiednich działów.

W analizowanym obszarze w okresie 1989-2013 nie było pożarów bardzo dużych powyżej 100 ha. Przedziały wielkości pożarów przyjęto za Rozporządzeniem Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji w sprawie szczegółowych zasad organizacji krajowego systemu ratowniczo-gaśniczego (*Dz. U. z 1999 nr 111 poz. 1311*).

Ze względu na dominujący udział pożarów małych i średnich w obszarze ostrość pożarów jest zazwyczaj mała. Niewiele jest pożarów piętrowych, obejmujących wyższe partie



roślinności i pożarów trwających więcej niż kilka godzin. Zdecydowana większość występujących w obszarze pożarów leśnych opisywana jest w raportach straży pożarnej jako powierzchniowe.

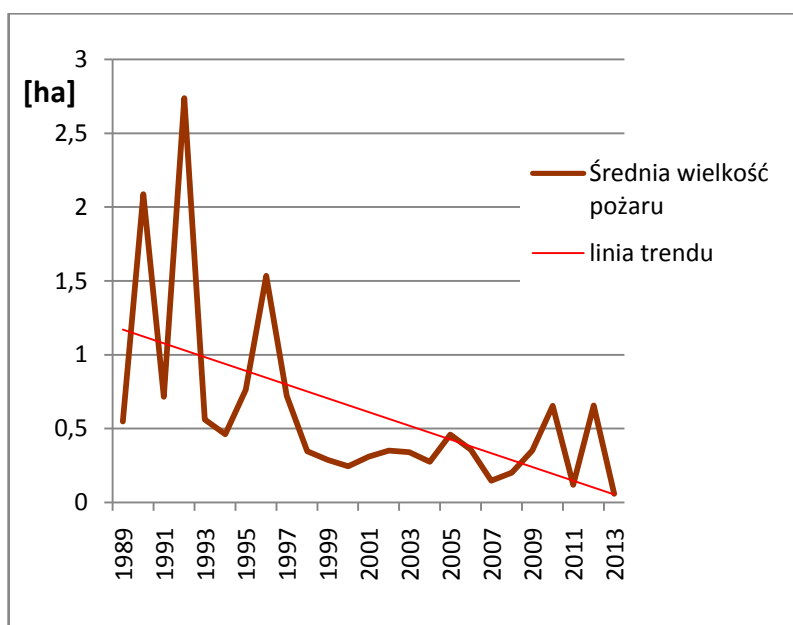
Roczne liczby pożarów w okresie 1989-2013 nie wykazują wyraźnej tendencji. Liczba pożarów oscyluje od kilku do kilkudziesięciu rocznie. Wyróżnia się rok 1992 z jedną z największych liczb pożarów i rekordową powierzchnią spaloną 161 [ha], za co odpowiadają w dużej mierze 2 pożary z 29 sierpnia, podczas których spłonęło łącznie 122 ha. Analiza całkowitej wielkości powierzchni spalanej w pożarach rocznie wskazuje na tendencję spadkową. Jest ona widoczna również, gdy wykluczmy ekstremalny rok 1992 ze statystyki.

Tabela 3.1. Liczba pożarów i wielkość spalanej powierzchni rocznie w latach 1989-2013

<b>Rok</b>	<b>Liczba pożarów</b>	<b>Powierzchnia spalona [ha]</b>	<b>Powierzchnia średnia pożaru</b>
1989	28	15,38	0,55
1990	13	27,14	2,09
1991	16	11,44	0,72
1992	59	161,50	2,74
1993	17	9,53	0,56
1994	39	18,03	0,46
1995	5	3,81	0,76
1996	19	29,17	1,54
1997	17	12,28	0,72
1998	16	5,56	0,35
1999	33	9,51	0,29
2000	43	10,49	0,24
2001	23	7,13	0,31
2002	29	10,21	0,35
2003	40	13,64	0,34
2004	21	5,79	0,28
2005	58	26,66	0,46
2006	42	14,98	0,36
2007	18	2,65	0,15
2008	30	6,02	0,20
2009	60	21,01	0,35
2010	5	3,27	0,65
2011	6	0,72	0,12
2012	31	20,36	0,66
2013	7	0,41	0,06

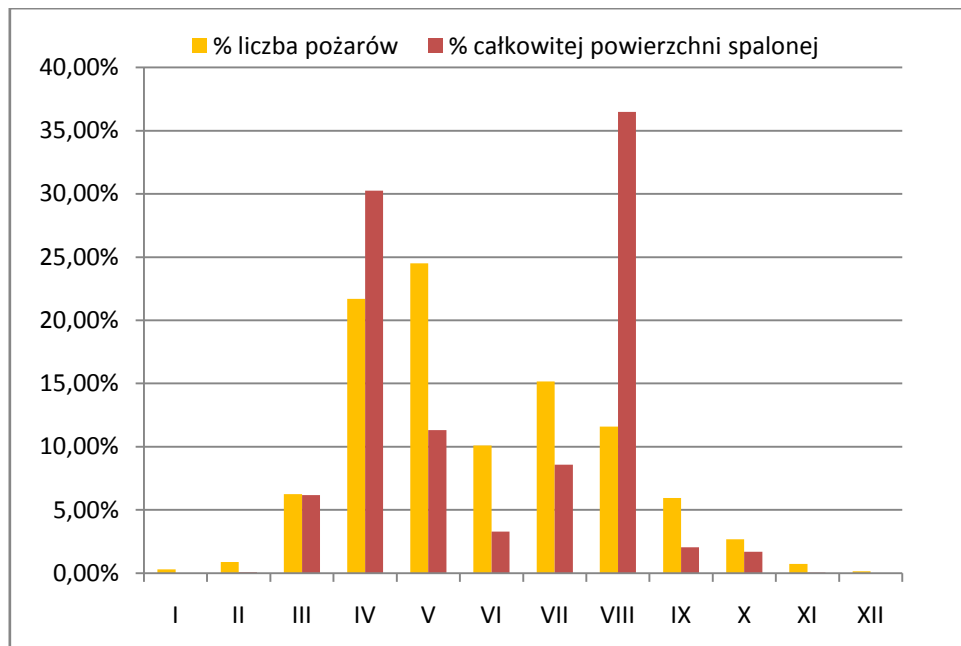
Spadek wyraźniej widoczny jest w wielkości średniego pożaru. Spowodowane jest to głównie zwiększeniem szybkości systemu detekcji i reakcji na pożary, w tym

usprawnieniem komunikacji. W latach 80 i 90 ubiegłego wieku na terenach wiejskich brakowało telefonów. W skrajnych przypadkach we wsi był tylko jeden telefon u sołtysa. Jeśli ktoś zauważył pożar tracił dużo czasu na znalezienie telefonu i dodzwonienie się do straży pożarnej. Rozmowy telefoniczne łączone były wówczas przez centralki. Istniała co prawda możliwość szybszego połączenia na hasło „ratunek”, jednak zajmowało to więcej czasu niż automatyczne połączenie. Tak więc w początkowym, kluczowym stadium pożaru tracono od kilkunastu do kilkudziesięciu minut na samo powiadomienie straży pożarnej. Pojawiały się również problemy z lokalizacją pożarów. Obecnie przy powszechnej dostępności telefonów komórkowych strażacy otrzymują bezzwłocznie zgłoszenie, często od kilku osób naraz. Dyżurny powiatowej straży pożarnej może od razu uruchomić zdalnie syrenę w ochotniczej straży pożarnej i wysłać sms do strażaków. Oprócz tego ma do dyspozycji straż zawodową. Strażacy korzystają z technologii GPS. Dodatkowo prowadzone są obserwacje lasu w sezonie pożarowym, gdy warunki pożarowe sprzyjają powstawaniu pożaru. Służą do tego wieże obserwacyjne w nadleśnictwach z kamerami cyfrowymi. Zdjęcia z wież są oglądane na monitorach przez 2 dyżurnych. Wykrywalność pożaru jest dużo większa i reakcja systemu jest szybsza.



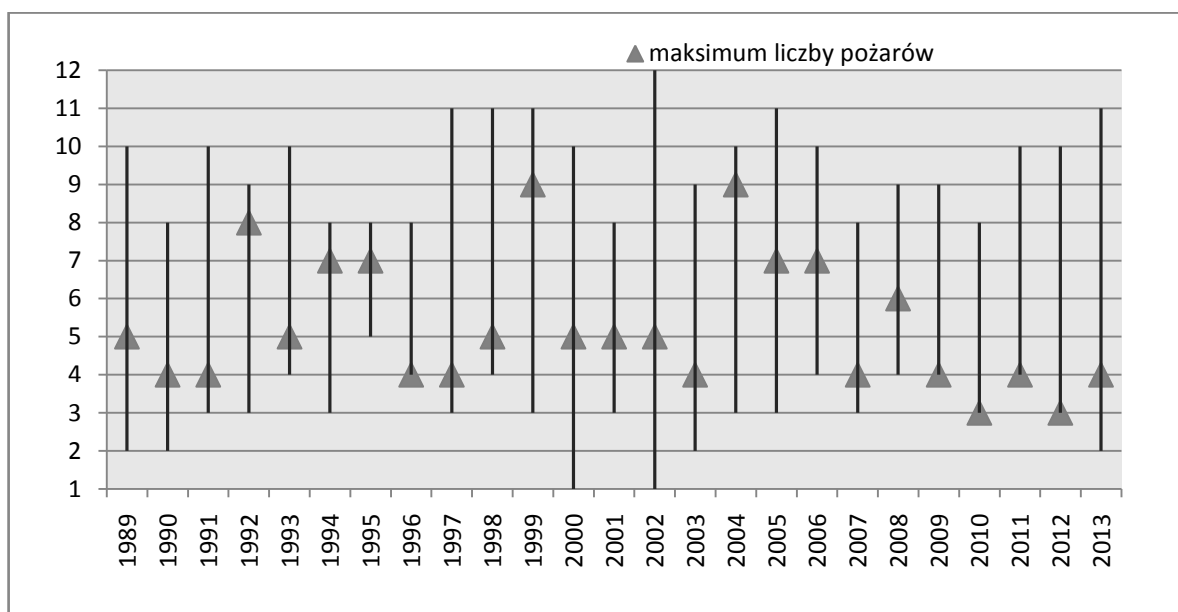
Rysunek 3.2. Zmiany średniej wielkości pożaru w obszarze badawczym w latach 1989-2013

Sezon pożarowy trwa na obszarze LKP „Lasy Spalsko-Rogowskie” od marca do października. Zdarzały się również pożary w styczniu, lutym, listopadzie i grudniu, ale miały charakter incydentalny.



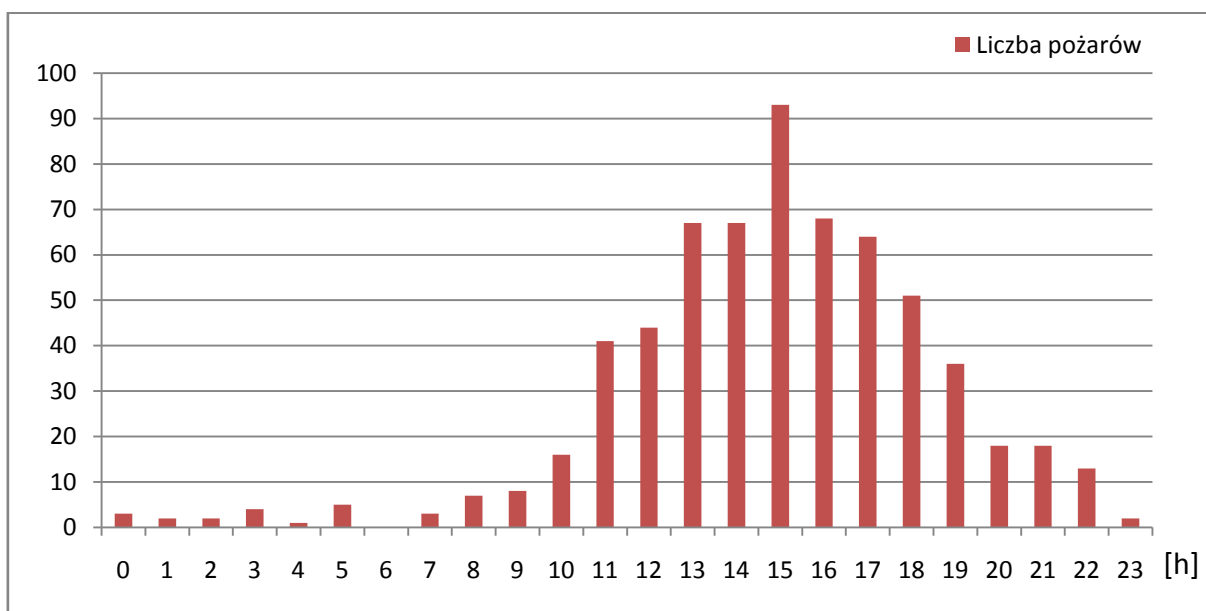
Rysunek 3.3. Rozkład liczby pożarów i spalonej powierzchni w poszczególnych miesiącach w latach 1989-2013

W ciągu roku wyraźnie zaznaczają się 2 maksima liczby pożarów. Pierwsze największe maksimum ma miejsce w maju, drugie w lipcu. Największa powierzchnia lasów ulega spaleni w kwietniu i sierpniu. Na tą statystykę wpływ mają dwa duże pożary z 29 sierpnia 1992 r. , w których łącznie spaliło się 27,31% całkowitej powierzchni spalonej w rozpatrywanym 25-leciu. Po usunięciu pożarów z tego dnia ze statystyki udział powierzchni spalonej w sierpniu spada do 9,07%.



Rysunek 3.4. Długości i maksimum sezonu pożarowego w obszarze badawczym w latach 1989-2013

Na przestrzeni analizowanych 25 lat sezon pożarowy trwał w poszczególnych latach od 4 do 12 miesięcy. Zmiany długości sezonu miały charakter nieregularny. Również maksimum liczby pożarów pojawiało się w różnych miesiącach w sposób uzależniony od warunków meteorologicznych.



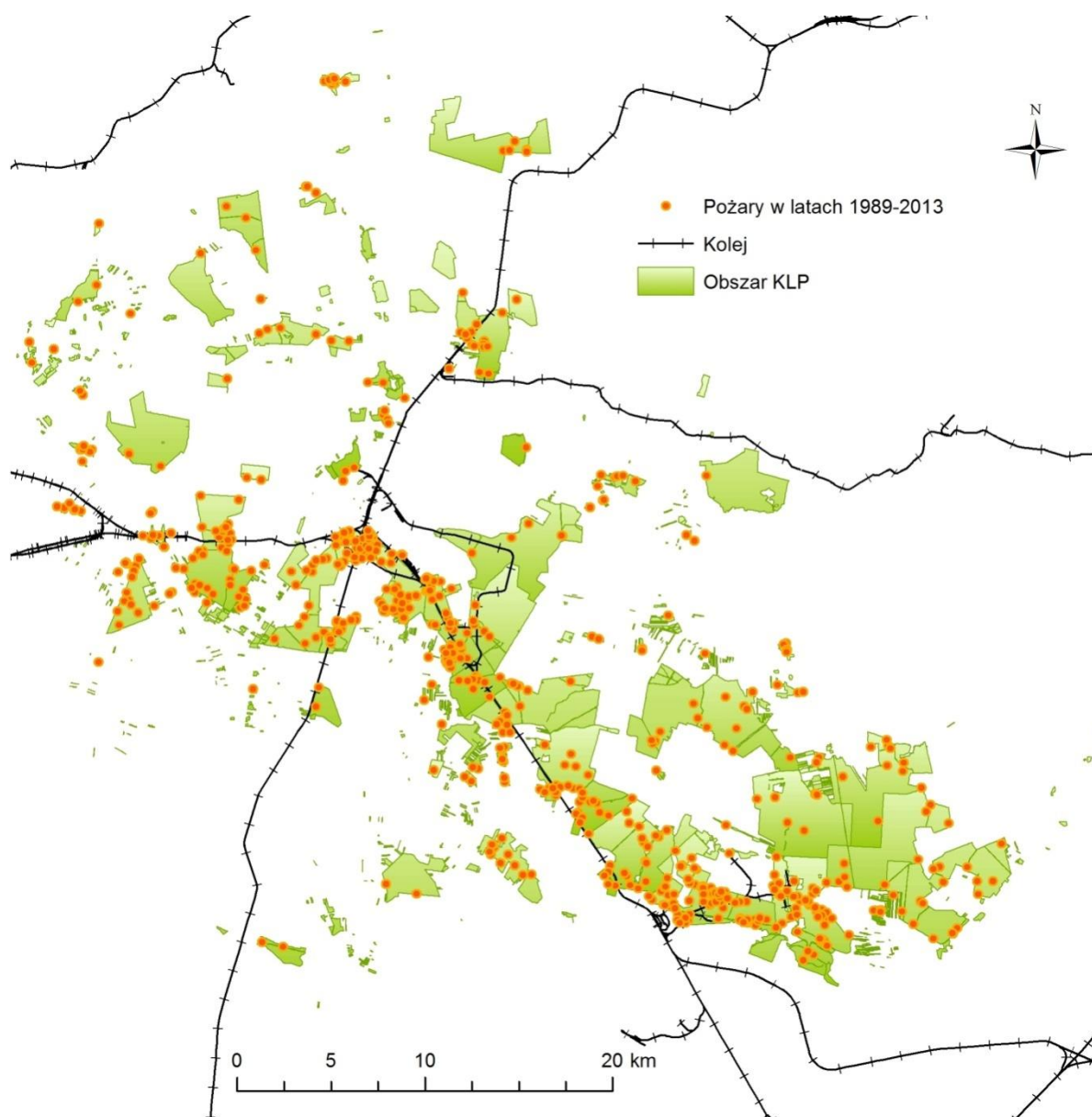
Rysunek 3.5. Godziny występowania pożarów w obszarze badawczym w latach 1989-2013.

Rozkład dobowy powstawania pożarów wykazuje maksimum w godzinach popołudniowych, w okolicach godziny piętnastej. Rozkład dobowy pożarów odzwierciedla dobowy rozkład warunków meteorologicznych temperatury i niedoboru wilgotności, mających wpływ na podatność ściółki na zapłon. Pokrywa się również z dobową aktywnością człowieka, będącego głównym źródłem zapłonu.

### 3.4 Rozkład przestrzenny pożarów, zróżnicowanie reżimów w leśnictwach

Rozkład przestrzenny pożarów wskazuje, iż duża część pożarów występuje w bliskim sąsiedztwie sieci kolejowej. Aż 47,41% pożarów z obszaru badawczego ma miejsce w odległości do 1 km od torów. Odpowiada to 62,95% spalonej powierzchni. W odległości do 50 m pożarów jest znacznie mniej ok. 3,11%. Należy jednak pamiętać, że współrzędne punktów opisujących pożary odpowiadają ich średniej lokalizacji a nie lokalizacji punktu zapłonu.

Na tak dużą liczbę pożarów w tym rejonie wpływa również sieć dróg i gęsta zabudowa towarzysząca infrastrukturze kolejowej.



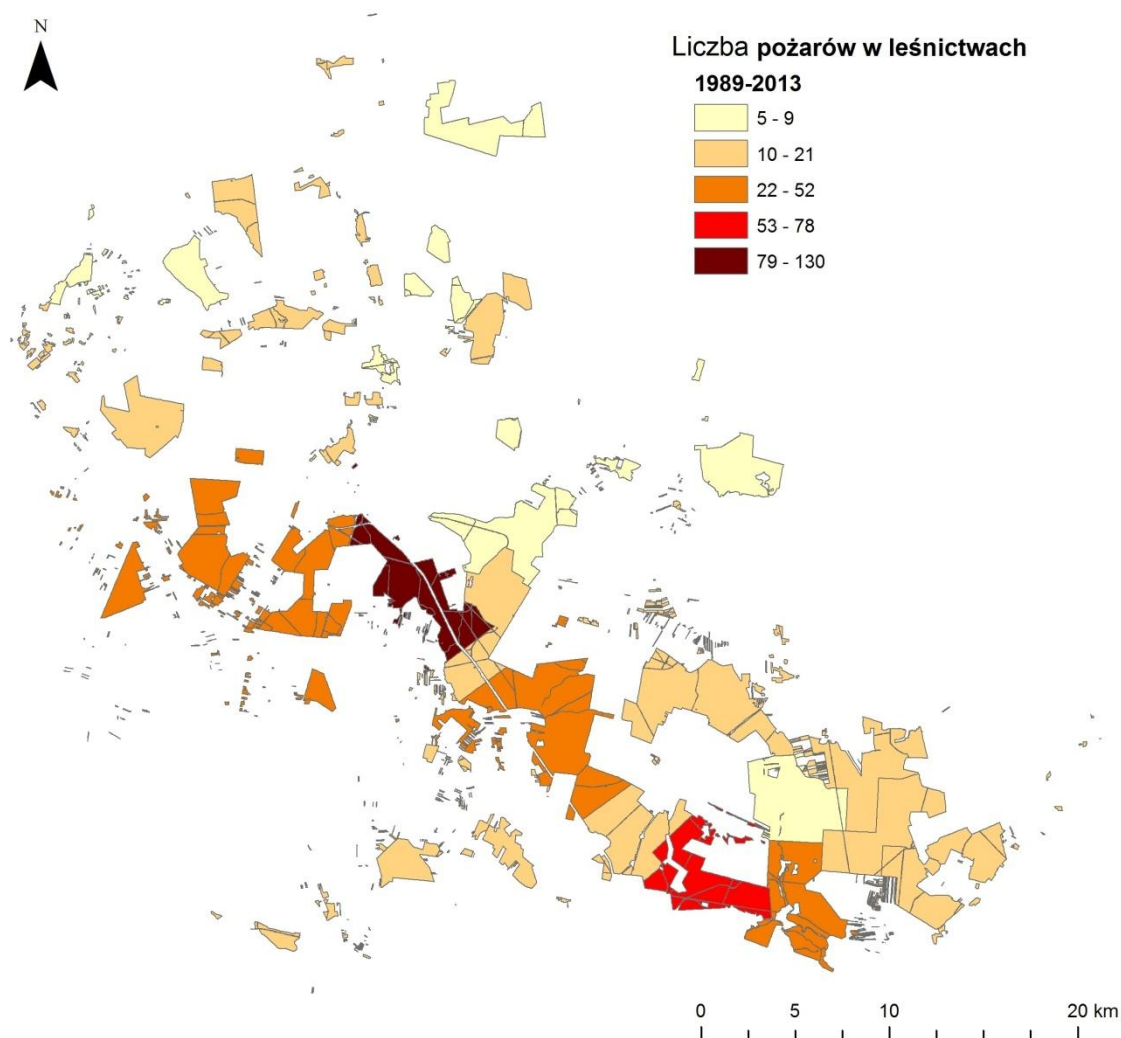
Mapa 3.1. Lokalizacja pożarów leśnych na terenie LKP „Lasy Spalsko-Rogowskie” w latach 1989-2013

Tabela 3.2. Liczba pożarów i wielkość powierzchni spalonej w obszarze badawczym w zależności od odległości od sieci kolejowej. Dane z lat 1989-2013

Odległość od torów [m]	Liczba pożarów	Procent wszystkich pożarów w obszarze badawczym	Spalona powierzchnia [ha]	Procent całkowitej spalanej powierzchni
50	21	3,11%	9,77	2,19%
100	67	9,93%	127,55	28,56%
200	116	17,19%	149,76	33,53%
500	196	29,04%	225,37	50,46%
1000	320	47,41%	281,17	62,95%

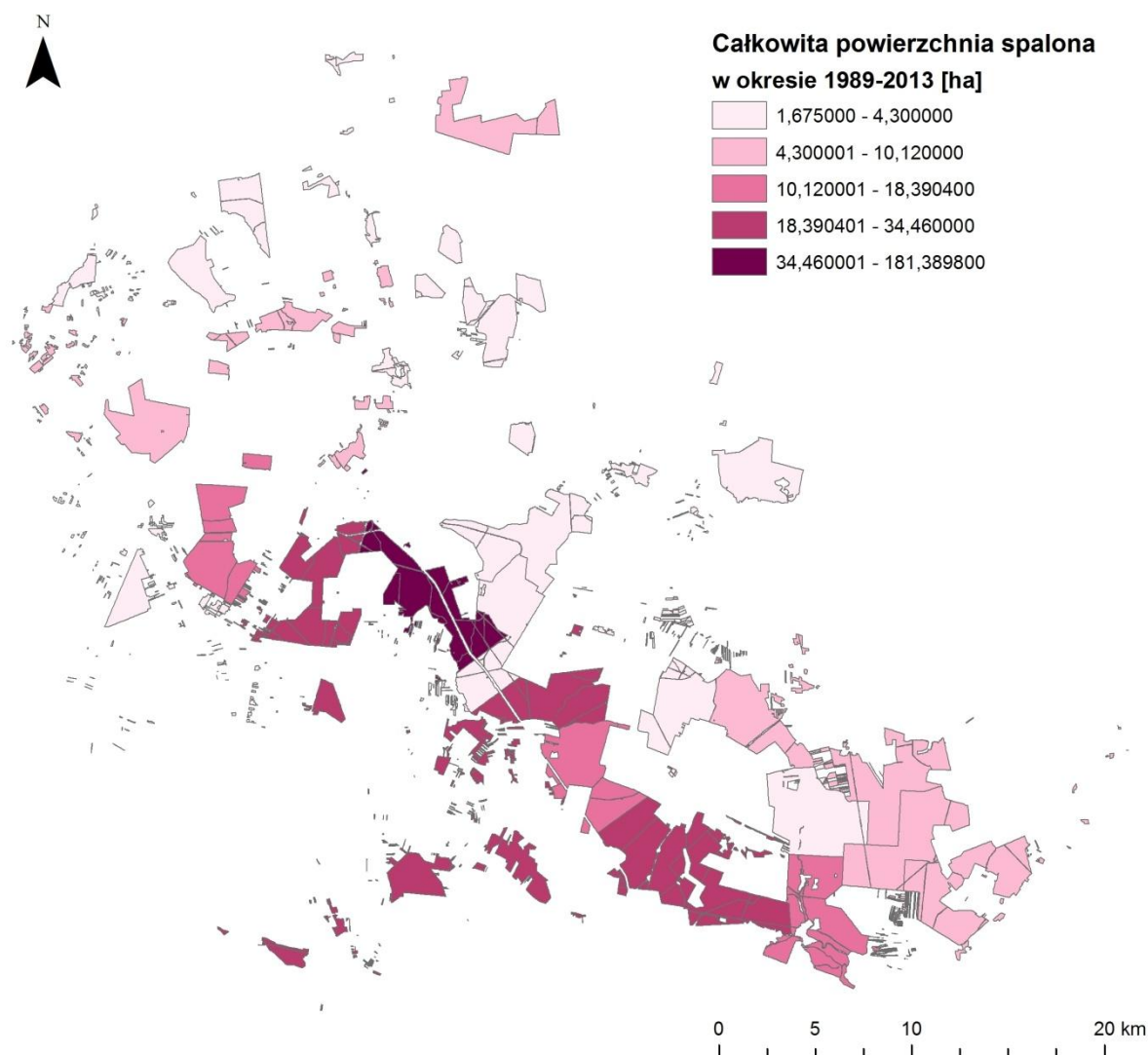
Ta zależność przekłada się na liczbę pożarów w poszczególnych leśnictwach. Obszarami o największej liczbie pożarów są leśnictwa:

- Zieleń w nadleśnictwie Brzeziny, na terenie którego znajduje się węzeł kolejowy Koluszki
- Luboszewy w nadleśnictwie Spała, przez który przechodzą linie kolejowe i drogi dojazdowe do miasta Tomaszów Mazowiecki
- Rokiciny w nadleśnictwie Brzeziny, przez które biegnie linia kolejowa Koluszki-Piotrków Trybunalski



Mapa 3.2. Liczba pożarów w leśnictwach obszaru badawczego w latach 1989-2013

Podobnie przedstawia się sytuacja w rozkładzie przestrzennym całkowitej spalonej powierzchni w leśnictwie. Tu również można zauważyć zwiększone wartości wzdłuż szlaków komunikacyjnych odchodzących od węzła Koluszki w stronę Tomaszowa Mazowieckiego i Piotrkowa.



Mapa 3.3. Całkowita powierzchnia spalona w leśnictwach obszaru badawczego w latach 1989-2013

W statystyce dominują pożary małe. Pomimo tego na całkowitą powierzchnię spaloną w leśnictwach wyraźniejszy wpływ ma grupa pożarów średnich, które co prawda zdarzają się ponad sześciokrotnie rzadziej niż pożary innych wielkości, ale za to odpowiadają za 43,5% powierzchni spalonej. W 14 z 25 leśnictw udział powierzchni pożarów średnich w całkowitej powierzchni spalonej przekracza 50%. Szczególnie widoczne jest to w leśnictwach, w których pożary zdarzają się rzadko tj. leśnictwo Lipce w LZD Rorów, w którym jeden pożar o powierzchni 6 ha odpowiada za blisko 92% powierzchni spalonej w ciągu 25 lat.

Pożary duże wystąpiły tylko w 4 leśnictwach: Zieleń, Budziszewice, Żywocin (nadleśnictwo Brzeziny) i Kruszewiec (nadleśnictwo Spała). W tych leśnictwach udział pożarów dużych w całkowitej powierzchni spalonej waha się od 31,5 % do 84,7%.

Leśnictwem o największej powierzchni spalonej jest Zieleń z nadleśnictwa Brzeziny. Od pozostałych leśnictw dzieli go rząd wielkości. Ma największą liczbę pożarów i spalonej powierzchni zarówno w grupie pożarów małych, jak i średnich. Ponadto w tym leśnictwie miał miejsce największy pożar w obszarze „Górniak”, który pochłonął 100 ha lasu.

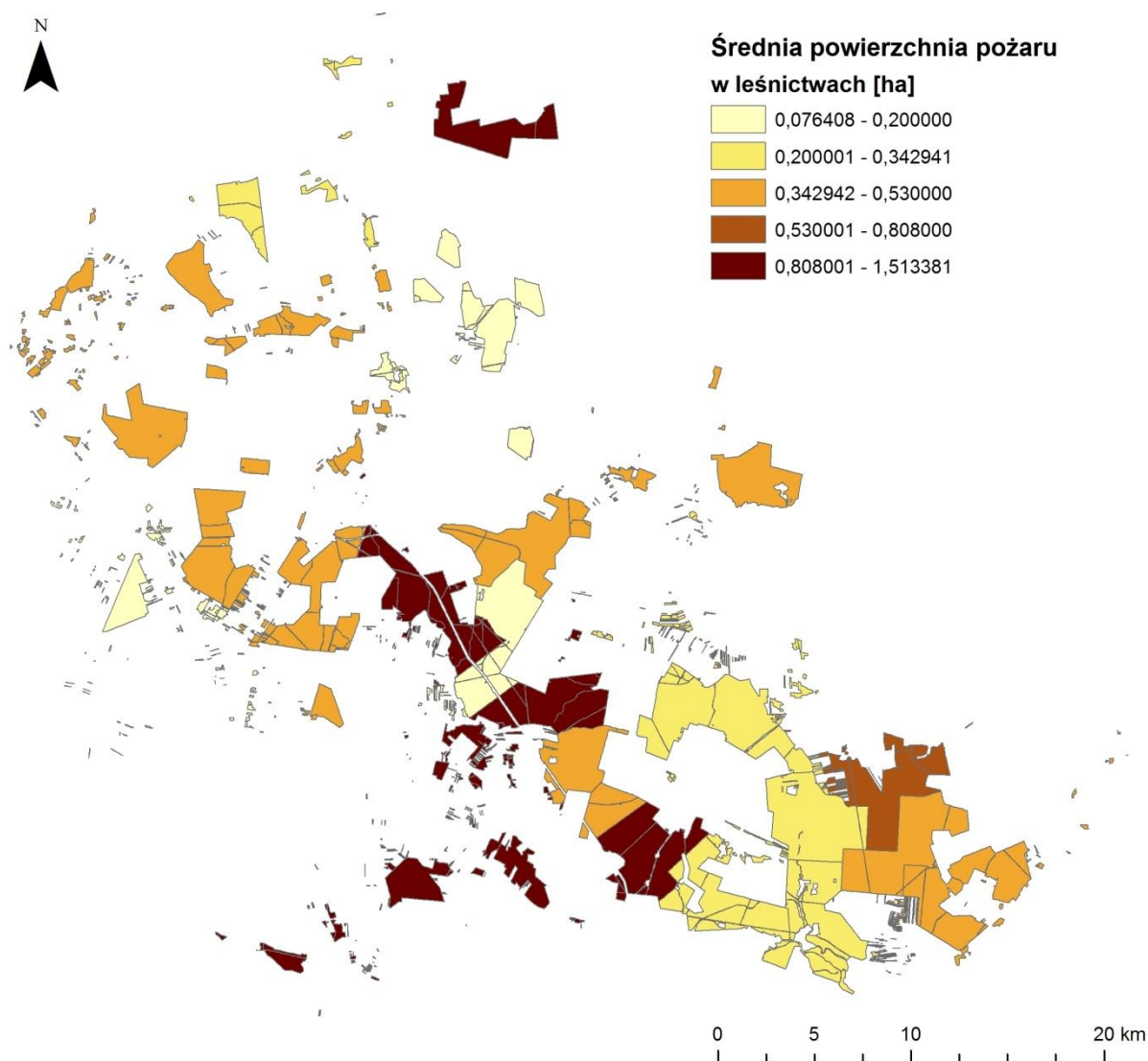
Tabela 3.3. Pożary według grup wielkościowych i nadleśnictw. Dane z okresu 1989-2013

Obszar	pożary małe <1		pożary średnie 1-10		pożary duże 10-100	
	Liczba	spalona powierzchnia [ha]	Liczba	spalona powierzchnia [ha]	Liczba	spalona powierzchnia [ha]
<b>leśnictwo</b>	<b>Nadleśnictwo Brzeziny</b>					
1 Poćwiardówka	13	3,1	1	1,2		
2 Janinów	4	0,81	1	1,3		
3 Tadzín	14	2,319	1	4		
4 Wiączyń	15	3,12	5	7		
5 Kraszew	39	2,0563	1	1		
6 Rokiciny	43	8,6542	9	14,41		
7 Galków	37	5,8904	5	12,5		
9 Redzeń	7	1,73	1	2		
11 Zieleń	98	20,7398	31	60,65	1	100
12 Wykno	12	2,176				
13 Budziszewice	24	2,16	3	7,3	1	25
14 Żywocin	18	3,9702			1	22
<b>leśnictwo</b>	<b>Nadleśnictwo Spała</b>					
1 Czólna	15	3,33	2	2,5		
2 Kierz	15	2,67	1	1,2		
3 Małecz	29	5,625	4	10,5		
4 Kruszewiec	13	1,081	7	20,7	1	10
5 Luboszewy	71	9,4353	7	14,7		
6 Wielka Wola	11	0,776	1	8,92		
7 Jasień	6	1,675				
8 Żądłowice	13	2,43	3	3,9		
9 Małomierz	12	3,023	2	3		
10 Borki	40	4,5	4	8,62		
<b>leśnictwo</b>	<b>LZD Rogów</b>					
1 Jasień	8	0,825	1	1		
2 Strzelna	13	1,7652				
3 Gluchów	5	1,17	1	2		
4 Lipce	4	0,236	1	6		

Udział pożarów dużych i średnich ponownie zaznacza się podczas analizy wartości wielkości średniego pożaru. W pierwszej piątce leśnictw z największą wartością średniej



powierzchni spalonej podczas jednego pożaru są wszystkie 4 leśnictwa, w których wystąpił pożar duży. Na czwartym miejscu plasuje się wspomniane wcześniej leśnictwo Lipce z małą częstotliwością pożarów, w którym jeden pożar średniej wielkości zdominował statystykę wielkości powierzchni spalonej. Leśnictwo Zieleń z rekordową liczbą 98 pożarów małych obronił drugie miejsce pod względem wielkości średniego pożaru ze względu na dużą powierzchnię spaloną w pożarach średnich i w pożarze dużym.



Mapa 3.4. Średnia powierzchnia spalona podczas pożaru w leśnictwach, wg danych z lat 1989-2013.

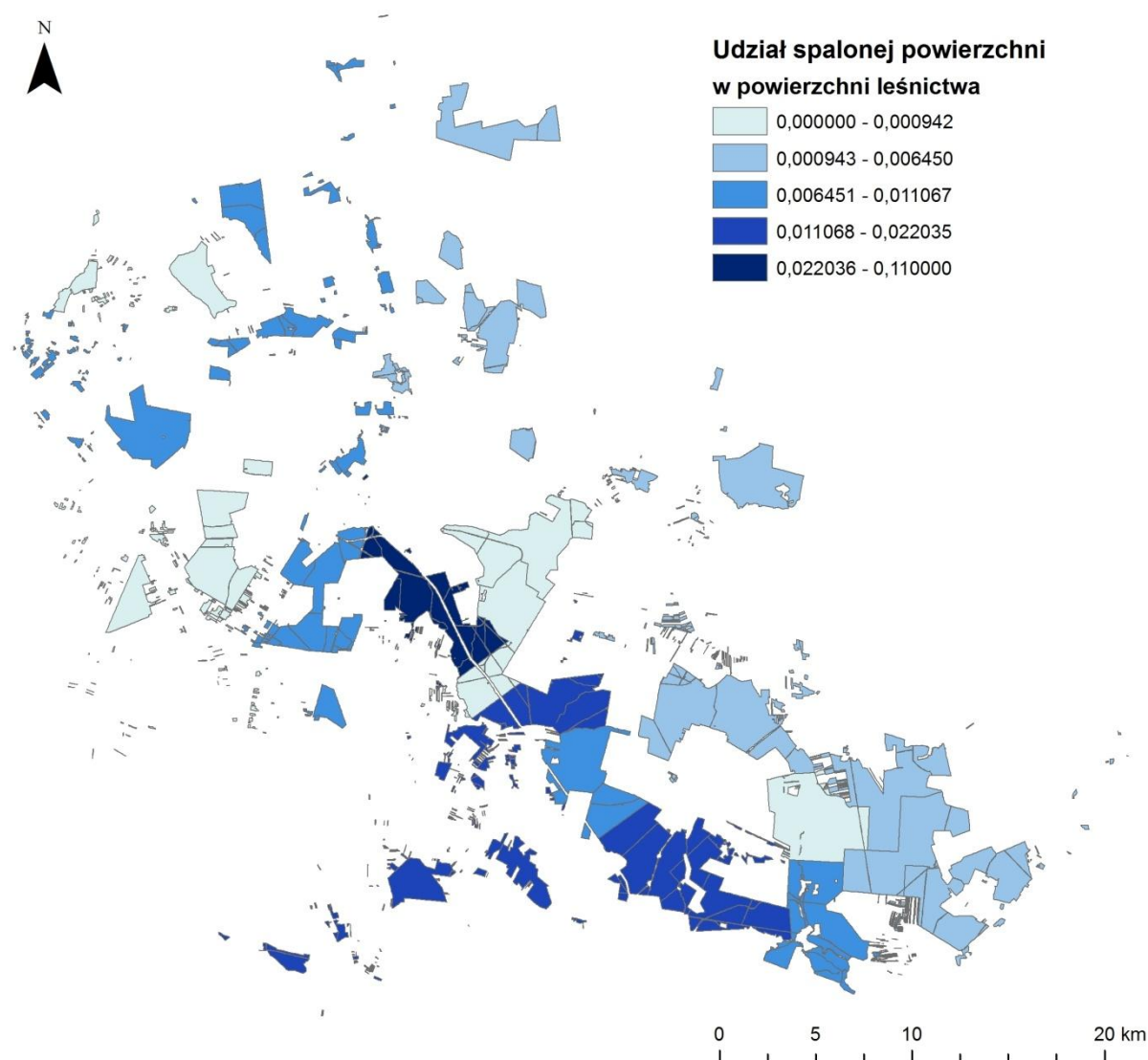
Tabela 3.4. Parametry charakteryzujące reżim pożarowy w leśnictwach w latach 1989-2013

Obszar	Powierzchnia leśnictwa	Liczba pożarów	Powierzchnia całkowita pożarów[ha]	Powierzchnia max pożaru [ha]	Powierzchnia średnia pożaru [ha]	Udział powierzchni spalonej w powierzchni leśnictwa
<b>Nadleśnictwo Brzeziny</b>	<b>15665,91</b>	<b>385,00</b>	<b>315,09</b>	<b>100,00</b>	<b>0,8184</b>	<b>2,01%</b>
<b>1 Poćwiardówka</b>	804,10	14	4,30	1,20	0,3100	0,53%
<b>2 Janinów</b>	839,58	5	2,11	1,30	0,4220	0,25%
<b>3 Tadzín</b>	921,93	15	6,32	4,00	0,4213	0,69%
<b>4 Wiączyń</b>	1271,17	20	10,12	2,00	0,5060	0,80%
<b>5 Kraszew</b>	717,44	40	3,06	1,00	0,0764	0,43%
<b>6 Rokiciny</b>	1726,66	52	23,06	5,00	0,4435	1,34%
<b>7 Gałków</b>	1431,02	42	18,39	3,00	0,4379	1,29%
<b>9 Redzeń</b>	1671,07	8	3,73	2,00	0,4663	0,22%
<b>11 Zieleń</b>	1615,12	130	181,39	100,00	1,3953	11,23%
<b>12 Wykno</b>	1556,26	12	2,18	0,80	0,1813	0,14%
<b>13 Budziszewice</b>	1671,62	28	34,46	25,00	1,2307	2,06%
<b>14 Żywocin</b>	1439,94	19	25,97	22,00	1,3669	1,80%
<b>Nadleśnictwo Spała</b>	<b>15531,06</b>	<b>257,00</b>	<b>118,59</b>	<b>10,00</b>	<b>0,4614</b>	<b>0,76%</b>
<b>1 Czółna</b>	1389,34	17	5,83	1,50	0,3429	0,42%
<b>2 Kierz</b>	1260,64	16	3,87	1,20	0,2419	0,31%
<b>3 Małecz</b>	1457,01	33	16,13	3,00	0,4886	1,11%
<b>4 Kruszewiec</b>	1442,29	21	31,78	10,00	1,5134	2,20%
<b>5 Luboszewy</b>	1478,40	78	24,14	3,30	0,3094	1,63%
<b>6 Wielka Wola</b>	1641,25	12	9,70	8,92	0,8080	0,59%
<b>7 Jasień</b>	1777,20	6	1,68	0,75	0,2792	0,09%
<b>8 Żądłowice</b>	1695,44	16	6,33	1,50	0,3956	0,37%
<b>9 Małomierz</b>	1696,87	14	6,02	2,00	0,4302	0,35%
<b>10 Borki</b>	1692,63	44	13,12	4,22	0,2982	0,78%
<b>LZD Rogów</b>	<b>3672,30</b>	<b>33,00</b>	<b>13,01</b>	<b>6,00</b>	<b>0,3942</b>	<b>0,35%</b>
<b>1 Jasień</b>	835,87	9	1,83	1,00	0,2000	0,22%
<b>2 Strzelna</b>	741,76	13	1,77	0,80	0,1400	0,24%
<b>3 Głuchów</b>	1127,92	6	3,17	2,00	0,5300	0,28%
<b>4 Lipce</b>	966,75	5	6,24	6,00	1,2500	0,65%

W okresie 1989-2013 spaliło się 2,1% powierzchni leśnej nadleśnictwa Brzeziny, 0,76% powierzchni nadleśnictwa Spała i 0,35% LZD Rogów. Pomimo większego udziału łatwopalnych gatunków iglastych i drzewostanu jednopiętrowego w nadleśnictwie Spała to nadleśnictwo Brzeziny jest bardziej zagrożone pożarowo. Przeważał tu wpływ antropogeniczny i większa gęstość źródeł zapłonu. Najbardziej wrażliwym obszarem jest leśnictwo Zieleń. Przewyższa o rząd wielkości inne leśnictwa pod względem liczby pożarów,

całkowitej powierzchni spalonej, wielkości maksymalnego pożaru i udziału spalonej powierzchni w powierzchni leśnictwa.

Innymi wrażliwymi na ogień leśnictwami są Luboszewy, Rokiciny, Budziszewice, Kruszewiec i Żywocin.



Mapa 3.5. Udział całkowitej powierzchni spalonej do powierzchni leśnictw w latach 1989-2013

### 3.5. Wpływ warunków meteorologicznych na występowanie pożarów

Warunki meteorologiczne mają duży wpływ na stan wilgotności lasu i jego zdolność do zapłonu i propagacji ognia. Zależność od temperatury i wilgotności nie przekłada się jednak liniowo na liczbę pożarów i wielkość spalonej powierzchni. Pożary leśne są złożonym zjawiskiem wymagającym oprócz sprzyjających warunków meteorologicznych występowania

źródła zapłonu w odpowiednim miejscu i czasie. Powierzchnia spalona jest pod silnym wpływem supresji przez straż pożarną i często większy wpływ na jej wielkość ma szybka detekcja i skuteczna akcja gaśnicza niż wiatr czy wilgotność ściółki.

Wskaźniki korelacji Pearsona wykazują jednak pewną zależność liczby pożarów od parametrów meteorologicznych. Do analizy wykorzystano dane dobowe z okresu 1989-2013 pochodzące ze stacji meteorologicznej IMGW w Sulejowie. Rozpatrując warunki pożarowe w trakcie sezonu pożarowego od marca do października stwierdzono słabą zależność liczby pożarów od występującej danego dnia wilgotności względnej. Zależność ta nieznacznie wzrasta przy analizie wartości średnich i maksymalnych z trzech ostatnich dni przed pożarem. Na liczbę pożarów wpływ mają warunki wilgotnościowe panujące w ciągu kilku dni przed pojawieniem się źródła zapłonu, przy czym istotniejsze są wartości średnie niż wartości maksymalne.

Tabela 3.5. Wskaźniki korelacji Pearsona dla liczby pożarów danego dnia w zależności od warunków meteorologicznych panujących danego dnia

Korelacja z liczbą pożarów	T_śr	T_max	Wil_śr	Wil_max	opad
<b>r</b>	0,131	0,169	-0,318	-0,236	-0,050
<b>r (3)</b>	0,111	0,139	-0,335	-0,243	-0,102
<b>r (7)</b>	0,088	0,116	-0,320	-0,194	-0,131

(3) – w ciągu 3 ostatnich dni, (7) – w ciągu ostatniego tygodnia; T\_śr – temperatura średnia, T\_max – temperatura maksymalna, Wil\_śr – średnia wilgotność względna, Wil\_max – maksymalna wilgotność względna, opad – suma opadu dla odpowiednio doby, 3 dni i tygodnia.

Nie stwierdzono istotnej zależności liniowej między liczbą pożarów a temperaturą średnią lub maksymalną z danego dnia lub kilku dni poprzedzających. Temperatura będzie jednak mieć wpływ pośredni poprzez oddziaływanie na warunki wilgotnościowe.

Nie stwierdzono również istotnej korelacji między wielkością spalonej powierzchni a warunkami termicznymi i wilgotnościowymi. Zaznacza się tu przeważający wpływ supresji na wielkość pożarów. Również analiza wpływu prędkości wiatru w dniu pożaru (średniej i maksymalnej) na powierzchnię spaloną nie wykazała istotnej zależności liniowej. Spowodowane jest to względnie niskimi wartościami prędkości wiatru w dniach pożaru dochodzącymi maksymalnie do 16 m/s. Poza tym jest to prędkość zmierzona na Stacji

Sulejów. W warunkach leśnych przy zwartym drzewostanie prędkość ta może być znacznie wytłumiona.

Statystyka nie pokazuje jednak całej prawdy o sytuacjach ekstremalnych. Przykładem tego jest lato z 1992 r. W obszarze badawczym w okresie od czerwca do końca sierpnia 1992 miało miejsce 47 pożarów leśnych, w których spaliło się 154,4 ha, co stanowi 34,6% całkowitej powierzchni leśnej spalonej w obszarze badawczym w okresie 25 lat. Lato 1992 roku było wyjątkowo upalne i suche. Średnia temperatura w okresie letnim wynosiła 19,4 °C, a średnia wilgotność względna 65%. W ciągu całego lata spadło wówczas zaledwie 107,6 mm deszczu. Apogeum sezonu przypada na dzień 29 sierpnia, w którym wybuchły 4 pożary, w tym 2 pożary duże o łącznej powierzchni spalonej 122 ha. Dzień ten poprzedzał długotrwały okres panowania wysokiej temperatur przy znikomych opadach. Temperatura średnia z 3 dni poprzedzających 29 sierpnia wynosiła 23,1 °C. Temperatury maksymalne w dniach poprzedzających pożar oscylowały w okolicach 30 °C. W dniu pożaru temperatura maksymalna wyniosła 35,6°C. Największy pożar, który strawił 100 ha lasu trwał 3 dni i wraz z pozostałymi trwającymi w tym czasie pożarami stanowił ogromne obciążenie systemu przeciwpożarowego.

Przy analizowaniu zjawiska jakim jest pożar należy pamiętać, że ma on charakter stochastyczny. Wpływa na niego szereg zmiennych, między innymi warunki meteorologiczne. Ich wartości w sposób bezpośredni wpływają na prawdopodobieństwo wystąpienia pożaru i jego określone zachowanie. Duża część zjawiska ma charakter przypadkowy.

#### **4. Mapowanie typów paliwa**

##### **4.1. Zmienne wpływające na palność lasu**

Pod względem zagrożenia pożarowego las jest paliwem zróżnicowanym. Jest to zbiorowisko roślin o różnych rozmiarach, właściwościach palnych, posiadających różną zdolność do magazynowania wilgoci. Palność roślinności leśnej zmienia się wraz ze zmianą parametrów meteorologicznych, w ciągu doby i w ciągu roku. Roślinność liściasta dodatkowo podlega corocznym cyklom wyrastania i obumierania listowia.

Paliwo w lesie jest w różny sposób rozłożone w przestrzeni. Roślinność leśna w zależności od topografii, rodzaju siedliska i występujących presji może być różna, od ubogiej monokultury do bogatego gatunkowo i wiekowo drzewostanu. Palność paliwa w lesie zależy od wielu zmiennych.

Zmienne wpływające na palność możemy podzielić na dwie główne grupy: zmienne o charakterze krótkotrwałym: zmienne meteorologiczne, oraz zmienne decydujące o charakterze paliwa w dłuższych przedziałach czasu, takie jak występujące gatunki drzew, ich wiek, wysokość, wilgotność siedliska, gęstość poszczególnych warstw lasu, ciągłość paliwa w poziomie i pionie, heterogeniczność paliwa, jego zwarcie, ilość martwych części roślinności, czy możliwość penetracji drzewostanu przez wiatr.

Palność drzewostanu zależy od tworzących go gatunków. Występowanie gatunków iglastych zwiększa palność, a liściastych zmniejsza. Dotyczy to wszystkich warstw lasu. Bardziej palne są zarówno same drzewa iglaste jak i ich igły w ściółce. Według badań statystycznych z 2008 r. ryzyko pożarowe w polskich lasach iglastych jest 5-10 krotnie wyższe niż w lasach zawierających gatunki liściaste (*K. Kozuchowski i in., 2008*).

Bardzo istotny jest również wiek drzew. Dojrzałe drzewostany są mniej podatne na ogień i mogą działać jak luki paliwowe, spowalniając lub wręcz zatrzymując pożar (*R. M. Roman-Cuesta i in., 2009*).

Palność lasu uzależniona jest od warunków meteorologicznych. Zdolność lasu do magazynowania wilgoci i buforowania zmian temperatury i wilgotności zależy od stopnia izolacji jego wnętrza za pomocą zamkniętego sklepienia i zwartych ścian. Na ryzyko pożarowe niekorzystnie wpływa fragmentacja lasu. Brzegi lasu wysychają szybciej i są bardziej podatne na ogień (*J. Barlow i in., 2012*).

Należy podkreślić, że wszystkie występujące w lesie gatunki roślin w odpowiednich warunkach wilgotnościowych mogą stać się łatwopalne. Gatunki liściaste podczas długotrwałych susz tracą wodę, co redukuje ich właściwości hamowania pożarów, przyczynia się do intensyfikacji ognia i w dużym stopniu zwiększa ilość dostępnego paliwa i długość trwania akcji gaśniczych.

W zdecydowanej większości przypadków pożar zaczyna się w pokrywie gleby. W najniższej warstwie występuje ściółka, złożona z martwych części roślin, głównie liści i igieł, drobnych gałęzi, korowiny i szyszek oraz runo- żywa roślinność porastająca dno lasu.

Palność martwego paliwa w ściółce leśnej zależy od rodzaju drzewostanu, wilgotności siedliska, upakowania elementów ściółki sprzyjającego lub zapobiegającego wietrzeniu i utracie wilgoci oraz od procentowego udziału celulozy i ligniny w martwym paliwie (*J. Barlow i in., 2012*). Występowanie w ściółce igieł i szyszek drzew iglastych zwiększa jej palność w ciągu całego roku. Ściółka drzew liściastych jest bardziej palna w okresach wczesnej wiosny i późnej jesieni, gdy nieulistnione korony drzew nie stanowią bariery dla wiatru i promieniowania słonecznego, które przyczyniają się do znacznego przesuszenia ściółki.

Runo leśne w zależności od warunków siedliska, w jakim występuje może zawierać gatunki o różnej zdolności magazynowania wody i o różnym procentowym udziale łatwopalnej ligniny i celulozy. Możliwość rozprzestrzeniania się ognia w warstwie runa zależy od wypadkowej cech tworzących go gatunków oraz od ciągłości paliwa. W polskich warunkach w runie występować mogą porosty, mchy, borówki, trawy i roślinność zielna.

Porosty posiadają niewielki udział ligniny i celulozy i potrafią magazynować duże ilości wody. Przesuszone palą się, ale charakteryzują się małym ciepłem spalania. Przy dużej liczbie porostów ich występowanie może zahamować rozprzestrzenianie się ognia.

Mchy mogą zarówno wspomagać proces spalania jak i go spowalniać. Będzie to zależało od poziomu ich wysycenia wodą, który może się wahać od 10% do 80%.

Borówki oraz roślinność zielna największą palność mają wczesną wiosną i w okresie jesiennym, gdy dużą ich część stanowi materiał martwy i ususzony. W okresie wegetacyjnym pojawia się świeża roślinność o dużej wilgotności, która dodatkowo ocienia ściółkę zmniejszając jej przesuszenie.

Trawy i wrzosi są elementami runa znacząco podnoszącymi ryzyko pożarowe. Oba elementy palą się wysokim płomieniem, dochodzącym do 3m, co tworzy ryzyko pożarów podszytu i korony. Trawy występują w miejscach zasobnych w światło słoneczne. Mogą ulegać zapaleniu nawet, gdy ich wilgotności przekracza 30%. Trawy osiągają duże rozmiary i dają duży ładunek paliwa. Wrzosi z kolei zawierają duże ilości ligniny i celulozy. Są w stanie ulec zapłonowi nawet przy 40% wilgotności. Zapalone lekkie elementy traw i wrzosów mogą być przenoszone z wiatrem w trakcie pożaru i znacząco przyczynić się do jego rozprzestrzeniania.

Na powierzchni ziemi, oprócz ściółki i runa, może znajdować się także leżanina - zdrewniałe elementy drzew powstałe po wycince lub w sposób naturalny. W warunkach wilgotnych martwe zmurszałe drewno chłonie dużo wilgoci i nie stanowi zagrożenia palnego. W warunkach długotrwałej suszy pozbywa się wilgoci i stanowi duży ładunek dobrze palnego materiału (*J. Kaczmarowski, 2016*).

Kolejna warstwa – podszyt jest istotna dla możliwości rozprzestrzeniania się pożaru w pionie. Podszyt stanowią krzaki i młode drzewa do wysokości 6 m. W skład podszytu często wchodzi siewki drzew stanowiących wyższą warstwę lasu oraz młode drzewa z następnego stadium sukcesji. Oprócz tego często spotyka się leszczynę, czereśnię, jesiony. Generalnie gatunki liściaste obniżają potencjał palny warstwy, pod warunkiem, że zachowają wystarczającą ilość wilgoci. Młode drzewa gatunków iglastych o gęstej strukturze gałęzi sięgających do ziemi, z wieloletnimi igłami podnoszą ryzyko pożarowe. Gęste podszyty świerkowe i sosnowe w warunkach suchych umożliwiają szybką propagację ognia. Mniej palne właściwości ma młoda jodła. Właściwości palne zwiększają również niskie iglaki z dużą zawartością olejków eterycznych i żywic jak jałowiec. W podszycie spotkać można również zasuszone stojące drzewa - martwe paliwo powstałe w wyniku naturalnego procesu przerzedzania drzewostanu na skutek konkurencji o zasoby. Tak jak w poprzedniej warstwie dla propagacji ognia kluczowe znaczenie ma ciągłość łatwopalnej roślinności. (*J. Kaczmarowski, 2016*)

Warstwa drzew górująca nad niższymi warstwami będzie determinować warunki palne na wiele sposobów. Stanowi ona granicę systemu leśnego z zewnętrznym środowiskiem i od jej szczelności zależy stopień wymiany wilgoci z otoczeniem i możliwość buforowania warunków termicznych wewnątrz lasu.

Drzewostany z zamkniętym sklepieniem ograniczają możliwości docierania promieniowania słonecznego do niższych warstw. Hamują również pionowy ruch powietrza. Dzięki temu zmniejszone jest parowanie i system ma większą zdolność magazynowania wilgoci.

Wpływając na warunki świetlne, warstwa drzew, obok innych właściwości siedliska, determinuje skład gatunkowy i gęstość niższych warstw lasu. W zależności od stopnia zacienienia będą występować gatunki bardziej lub mniej cieniolubne. W skrajnym przypadku, jak np. w dojrzałym drzewostanie bukowym, warstwa podszytu i runa może zaniknąć, co czyni ten drzewostan odpornym na pożar koronowy powstały w wyniku zapłonu ściółki.



Tak jak w przypadku niższych warstw występowanie gatunków iglastych zwiększa możliwość zapłonu i propagacji ognia. Na obszarze badawczym gatunki iglaste dominują w drzewostanie. Przeważa sosna. W małych ilościach występuje również jodła, świerk i modrzew. Z wymienionych gatunków zagrożenie pożarowe najbardziej intensyfikuje świerk. Jest to gatunek szybko zapalający się i wydzielający dużą ilość ciepła. Posiada gęstą strukturę gałęzi sięgających do dna lasu, co umożliwia propagację wżwyż pożarów powierzchniowych. Podobne właściwości ma jodła. Sosna wraz ze wzrostem traci dolne gałęzie, dzięki czemu ewentualny pożar dna lasu nie ma paliwa łączącego go z koroną drzewa. Pień u starszych sosen tej łączności zazwyczaj nie zapewnia i w większości pożarów ulega jedynie okopceniu. Gałęzie młodych sosen z kolei sięgają do ziemi i rosną często w dużym zagęszczeniu, co z jednej strony zacienia ściółkę i zapobiega jej osuszeniu, ale z drugiej w sytuacji długo utrzymujących się warunków suchych staje się dużym ładunkiem dobrze palnego i ciągłego paliwa. Odrębnie należy rozpatrywać modrzew, który traci igły na zimę, dzięki czemu co roku ma świeże, młode igliwie. Dodatkowo modrzew produkuje mało igieł i zarówno korona drzewa, jak i ściółka pod nim jest mniej palna niż w przypadku innych gatunków iglastych. (*J. Kaczmarowski oraz D. D.B. Perrakis i in., 2016*).

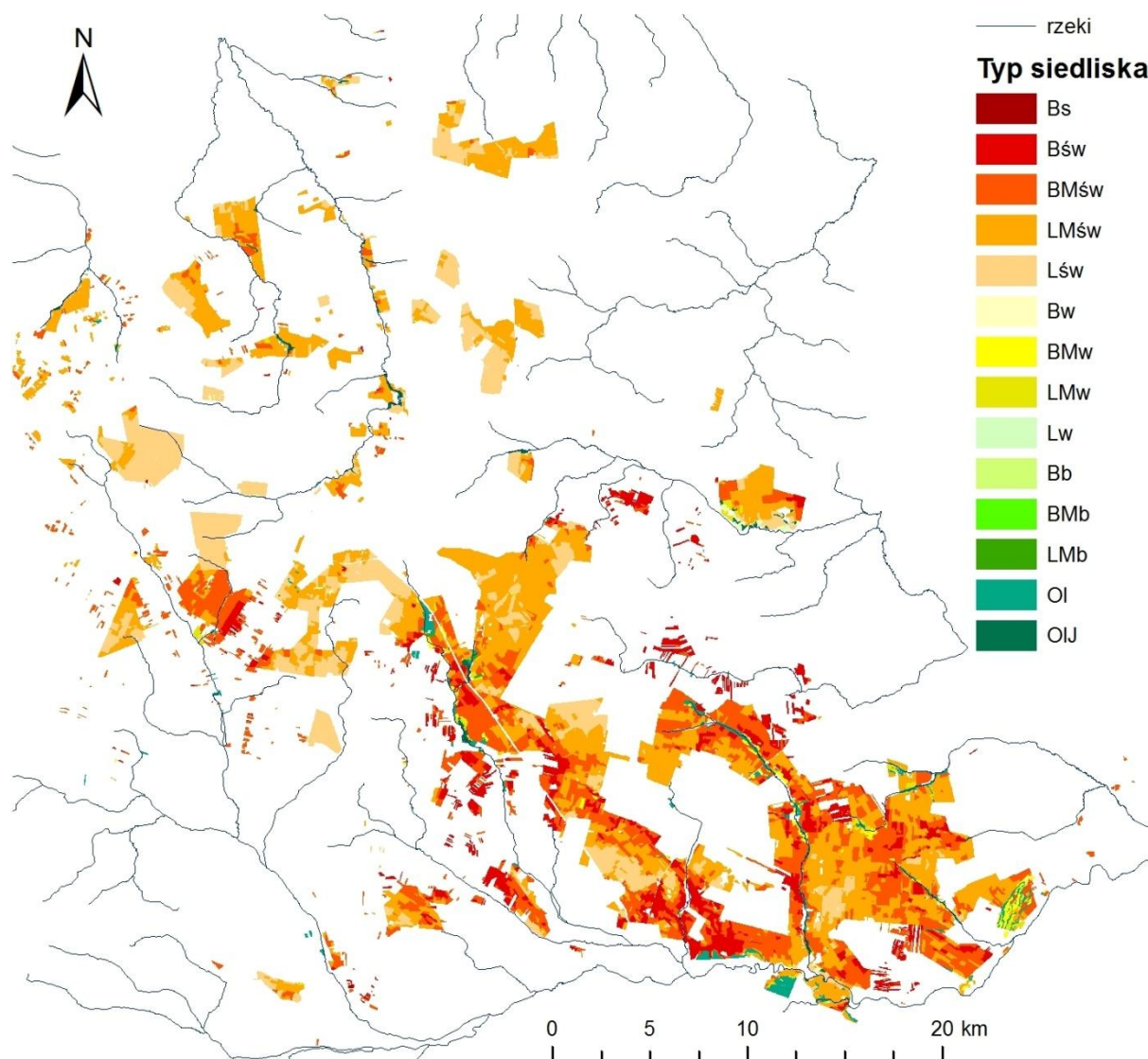
Drzewa liściaste wykazują różną palność w okresie wegetacyjnym i okresie bezlistnym. Wiosną, latem i wczesną jesienią obecność liści zmniejsza ryzyko pożarowe lasu dzięki magazynowaniu w nich wody i zacienianiu podłoża. W okresie od jesieni do wczesnej wiosny nagie korony drzew liściastych przepuszczają do dna lasu duże ilości promieniowania słonecznego, co umożliwia przesuszanie ściółki i zwiększa możliwość powstania pożaru. Duża ilość przesuszonych martwych liści na ziemi łatwo ulega zapłonowi. Najwięcej pożarów w drzewostanach liściastych obserwujemy wczesną wiosną (*K. Kozuchowski i in., 2008*).

Oprócz gatunków drzew występujących na rozpatrywanym obszarze bardzo istotny wpływ na warunki palności mają warunki produkcyjne drzewostanów, takie jak żyzność i wilgotność gleby. Typ siedliska określa potencjalny typ roślinności, jaki może pojawić się na danym obszarze, przy założeniu braku zakłóceń naturalnych jak pląg szkodników, czy sztucznych jak wycinki drzew. Na typ siedliska wpływ mają panujące warunki klimatyczne. Określa on również wilgotność gleby i poziom wody gruntowej. Na terenie Leśnego Kompleksu Promocyjnego „Lasy Spalsko Rogowskie” występuje 14 typów siedlisk nizinnych: bór suchy, bór świeży, bór mieszany świeży, las mieszany świeży, las świeży, bór wilgotny, bór mieszany wilgotny, las mieszany wilgotny, las wilgotny, bór bagienny, bór mieszany bagienny, las mieszany bagienny, ols i ols jesionowy.

Tabela 4.1. Typy siedlisk występujące na obszarze Leśnego Kompleksu Promocyjnego „Lasy Spalsko Rogowskie” (*Otwarta Encyklopedia Leśna, weryfikacja według danych Nadleśnictw Spala i Brzeziny oraz LZD Rogów*)

Grupy wilgotnościowe siedlisk	Grupy żyźnościowe (troficzne) siedlisk				
	Bory	Bory mieszane	Lasy mieszane	Lasy	Lasy łęgowe
<b>suche</b>	Bór suchy Bs	-	-	-	-
<b>świeże</b>	Bór świeży Bśw	Bór mieszany świeży BMśw	Las mieszany świeży LMśw	Las świeży Lśw	-
<b>wilgotne</b>	Bór wilgotny Bw	Bór mieszany wilgotny BMw	Las mieszany wilgotny LMw	Las wilgotny Lw	*
<b>bagienne</b>	Bór bagienny Bb	Bór mieszany bagienny BMb	Las mieszany bagienny LMb	Ols Ol	Ols jesionowy Olj

\* las łęgowy – nie występuje na obszarze badawczym



Mapa 4.1. Typ siedlisk występujący na obszarze Leśnego Kompleksu Promocyjnego „Lasy Spalsko Rogowskie”(według danych z inwentaryzacji Nadleśnictwa Spala, Nadleśnictwa Brzeziny i LZD Rogów)

W obszarze badawczym dominują siedliska świeże: las mieszany świeży (40,4% powierzchni), bór mieszany świeży (24,5%), las świeży (18,7%) i bór świeży (9%). Siedliska świeże odzwierciedlają warunki przejściowe między środowiskiem suchym i wilgotnym. Wody gruntowe lub oglejenie gruntowe znajduje się głębiej niż w przypadku typów wilgotnych ale w wariancie silnie świeżym jest w zasięgu systemów korzeniowych drzew (głębokość 1,5-2 m). Siedliska świeże mogą występować też w wariancie bez wyraźnego wpływu wód gruntowych. Oznacza to, że wilgotność lasu na obszarze badawczym będzie w dużym stopniu uzależniona od warunków atmosferycznych i właściwości buforujących roślinności.

Siedliska wilgotne i bagienne w sumie stanowią niespełna 4,5% obszaru. Zlokalizowane są w bliskiej odległości od rzek. Siedlisko suche- bór suchy zajmuje niecały 1% LKP.

#### **4.2. Typy paliwa**

Skład gatunkowy, budowa poszczególnych pięter lasu i siedlisko to jedno z najistotniejszych zmiennych, za pomocą których można przypisać obszarom ogólne cechy palności – typ paliwa.

Przez typ paliwa należy rozumieć całą roślinność żywą i martwą występującą na danym obszarze, wraz z charakterystycznym dla niej podziałem na warstwy. Typ paliwa leśnego jest to zespół roślinności o dużej homogeniczności na danym obszarze, posiadający swoją własną charakterystykę prędkości rozprzestrzeniania się pożaru, intensywności, wysokości płomieni itp. (*G. Pelletier i in., 2009*).

Typ paliwa jest uproszczonym modelem roślinności pozwalającym ocenić możliwość powstania pożaru, jego dalszy rozwój w danym miejscu przy danych warunkach meteorologicznych, oraz parametry tego pożaru.

W dalszej części pracy wykorzystywany będzie kanadyjski model rozwoju pożaru PROMETHEUS oraz kanadyjska typologia paliwa leśnego. Danymi wejściowymi do modelu są przestrzenne informacje o typach paliwa, dlatego konieczne jest prawidłowe ich przyporządkowanie wydzieleniom leśnym obszaru badawczego.

Twórcy kanadyjskiego systemu przeanalizowali roślinność pod względem stratyfikacji, występujących gatunków, klas gęstości, wysokości i wieku, zakłóceń, ilości zgromadzonego martwego paliwa, drenażu i typu terenu oraz obszaru ekologicznego, w którym się znajduje. Uwzględnili również stopień ciągłości paliwa i jego przestrzenne zróżnicowanie. Wykorzystali dane z pożarów historycznych i parametry uzyskane podczas eksperymentów. Wydzielili 17 typów paliwa dla różnych rodzajów roślinności leśnej, w tym 16 typów dla drzewostanów.

Typy paliwa podzielono na 5 grup głównych:

- C – iglasta (*conifer*),
- D – liściasta (*deciduous*),
- M – mieszana (*mixed*),
- S - obszary po wycince (*slash*),
- O – otwarta/trawiasta (*open- grass*) (G. Pelletier i in., 2009)

#### Paliwa iglaste

Wyróżniono 7 klas paliw dla drzewostanów iglastych.

##### Typ paliwa **C-1** Las świerkowy z porostami

Otwarte, przypominające park drzewostany świerkowe, z małym udziałem sosny Banksa i brzozy papierowej. Występują na dobrze osuszonych wyżynach. Drzewostan jest rzadki w postaci pojedynczych drzew i gęstych kęp. Wysokość drzew jest zróżnicowana, ale ich gałęzie sięgają poszycia. Akumulacja paliwa drewnianego na dnie lasu jest bardzo mała i rozproszona. Pokrycie krzakami jest rzadkie. Powierzchnia ziemi jest w pełni wystawiona na działanie promieni słonecznych i pokryta przez porosty występujące w postaci ciągłych mat o wysokości 3-4 cm.

##### Typ paliwa **C-2** Północny świerk

Zasobny, gęsty drzewostan czarnego świerka, jednolity gatunkowo. Występuje na obszarach wyżynnych i nizinnych. Gałęzie drzew sięgają ziemi. Martwe gałęzie są zazwyczaj obrośnięte porostami (brodaczką). Kora na pniach jest łuskowata. Nisko występuje materiał drewniany w ilości od małej do średniej. Wśród krzaków dominuje bagno grenlandzkie. Dno lasu

porastają mchy i porosty (głównie chrobotki). Może występować torfowiec, ale on w niewielkim stopniu hamuje rozprzestrzenianie się pożaru. Spójna warstwa organiczna zazwyczaj nie przekracza 20-30 cm.

**Typ paliwa C-3** Dojrzała sosna Banksa lub sosna wydmowa:

Jednorodne gatunkowo, zasobne obszary (1000-2000 drzew/ha) drzewostanów sosny Banksa lub sosny wydmowej. Drzewostan dojrzały przynajmniej do fazy całkowitego zajęcia sklepienia. Linia bazowa koron jest wysoko ponad ziemią. Martwe paliwo na ziemi jest rzadkie i rozproszone. Powierzchnia ziemi jest pokryta pierzastym mchem na względnie głębokiej (ok 10 cm) zagęszczonej warstwie organicznej. Może występować rzadkie podszycie iglaste.

**Typ paliwa C-4** Niedojrzała sosna Banksa lub sosna wydmowa

Jednolite gatunkowo, gęste drzewostany (10000-30000 drzew/ha) sosny Banksa lub sosny wydmowej, w którym naturalna śmiertelność, wynikająca z wzajemnego zaduszania się, powoduje występowanie dużej liczby stojących i leżących martwych drzew. Charakterystyczna jest ciągłość pionowa i pozioma paliwa. Ładunek paliwa jest większy niż w typie C-3. Warstwa organiczna jest płytsza i mniej zbita. Ziemia pokryta jest igłami i niską warstwą krzaków.

**Typ paliwa C-5** Czerwona i biała sosna

Dojrzały drzewostan czerwonej sosny i wschodniej białej sosny w różnych proporcjach, czasami z małą domieszką białego świerka, brzozy papierowej i topoli osiki. Podszycie ma średnią gęstość i występuje w nim klon czerwony i jodła balsamiczna. W warstwie krzaków występuje w umiarkowanej ilości leszczyna dziobata. Powierzchnia ziemi jest pokryta mieszanką ziół i igieł sosnowych. Warstwa organiczna ma od 5 do 10 cm grubości.

#### Typ paliwa **C-6** Plantacja iglasta

Zasobne plantacje drzew iglastych z zamkniętymi koronami bez warstwy krzaków i podszycia. Ziemia pokryta jest igłami leżącymi na 10 cm warstwie ściółki leśnej.

#### Typ paliwa **C-7** Sosna żółta i daglezwia zielona

Drzewostan sosny żółtej i daglezwia zielonej w różnym wieku i w różnych proporcjach. Znaczącymi komponentami mogą być modrzew zachodni i sosna wydmowa. Drzewostany otwarte ze zwartymi i gęstymi kępami zarośli daglezwia zielonej i modrzewia. Podszycie nieciągłe. Zamknięcie sklepienia jest mniejsze niż 50%. Akumulacja drewna na powierzchni jest mała i rozproszona. Ziemia pokryta jest wiecznymi trawami, ziołami i rozproszonymi krzakami. Głównym paliwem powierzchniowym są igły. Warstwa ściółki leśnej jest płytsza niż 3 cm.

#### Paliwa liściaste

##### Typ paliwa **D-1** Bezlistna topola

Drzewostan półdorosłej topoli osiki przed puszczeniem pąków na wiosnę i po jesiennym opadaniu liści. Nie ma podszycia iglastego. Występuje dobrze rozwinięta warstwa krzaków średniego i wysokiego wzrostu. Martwe paliwo na ziemi stanowi niewielki udział paliwa ogólnego. Paliwo powierzchniowe zawiera głównie liście i zioła wystawione bezpośrednio na wiatr i promieniowanie słoneczne. Na wiosnę ściółka leśna ma wysoką wilgotność i w niewielkim stopniu stanowi zasób dostępnego paliwa.

##### Typ paliwa **D-2** Ulistniona topola

Ulistniony odpowiednik paliwa D-1 w okresie występowania listowia.

## Paliwa mieszane

### Typ paliwa **M-1** Północne lasy mieszane bez liści

Drzewostan mieszany zawierający następujące gatunki drzew iglastych i liściastych w różnych proporcjach: świerk czarny, świerk biały, jodła balsamiczna, jodła górską, topolą osiką, brzoza papierowa. W poszczególnych miejscach pojedynczych gatunków może brakować. W związku z różnorodnością gatunkową, w drzewostanach występuje duża zmienność w strukturze i stopniu rozwoju. Ten typ paliwa odpowiada bezlistnej porze roku od jesieni do wiosny przed puszczeniem pąków. Tempo rozprzestrzeniania się ognia jest oszacowane na podstawie procentowego udziału drzew iglastych w zaokrągleniu do 5%.

### Typ paliwa **M-2** Północne lasy mieszane-zazielenione

Ulistniony odpowiednik typu M-1 w okresie występowania listowia, uwzględniający sezonową zmianę palności w okresie od wiosny do jesieni. W lecie, gdy podszycie i wyższe warstwy są w liściach, rozprzestrzenianie paliwa jest znacznie zredukowane; maksymalna prędkość spada do 1/5 prędkości wiosennej lub jesiennej. Określa się procentowy udział drzew iglastych w zaokrągleniu do 5%.

### Typ paliwa **M-3** Martwa jodła balsamiczna, las mieszany-bez liści

Drzewostan mieszany, w którym rośnie jodła balsamiczna, wymieszana ze świerkiem pospolitym, sosną i brzozą. Powtarzająca się corocznie defoliacja, spowodowana atakiem szkodników powoduje śmiertelność jodły balsamicznej, za czym idzie odpadanie kory, rozwój porostów, pęknięcie i wywrócenie się drzewa po 5-8 latach od jego obumarcia. Objętość martwego paliwa na ziemi jest początkowo mała, ale wzrasta stopniowo wraz z postępującą dekompozycją będącą następstwem obumierania. Dno lasu jest mieszaniną pierzastych mchów, igieł drzew iglastych i liści. Warstwa organiczna jest względnie zbita, o głębokości 8-10 cm. Przy dużej masie martwych drzew, wiosenne pożary są wyjątkowo ostre i mogą przybierać postać pożaru powierzchniowego i koronowego. Duża warstwa paliwa powierzchniowego występuje od 4 do 5 lat od początku obumierania. Potencjał pożarowy lasu jest największy od 5 do 8 lat po jego obumarciu. Spada stopniowo wraz z rozkładem paliwa powierzchniowego i rozrastaniu się roślinności poszycia.

Typ paliwa **M-4** Martwa jodła balsamiczna, las mieszany- z liśćmi

Zielony odpowiednik paliwa M-3 w okresie ulistnionym. Letnie pożary są hamowane przez liście i niższą roślinność zieloną występującą w otwarciu sklepienia.

#### Paliwa – tereny po wycince

Typ paliwa **S-1** Gospodarka wycinkowa sosny Banksa i sosny wydmowej

Teren powstały po wycince mechanicznej dojrzałego drzewostanu sosny Banksa lub sosny wydmowej, do 2 lat po wycince. Czubki i gałęzie pozostawione w lesie powodują powstanie średniego i dość głębokiego ładunku paliwa przy powierzchni ziemi. Nie stosuje się żadnych zabiegów po wycince. Ziemia pokryta jest kobiercem mchu z igłami rozłożonymi w sposób nieciągły. Warstwa organiczna jest średnio głęboka i dość zbita.

Typ paliwa **S-2** Wycinka białego świerka

Wycinka mechaniczna dojrzałych i starych drzewostanów białego świerka, jodły górskiej i jodły balsamicznej, w okresie do 2 lat po wycince, przy braku zabiegów porządkowych. Ciągłość paliwa może być przerywana przez zniszczenia podczas wywózki. W lesie zostają czubki i gałęzie dające średni ładunek paliwa. Znaczące ilości kawałków drewna i rozkładających się drzew. Ziemia pokryta jest mchem ze znaczną ilością igieł. Warstwa organiczna jest względnie głęboka i zbita.

Typ paliwa **S-3** Wycinka cedru przybrzeżnego -choiny kanadyjskiej- daglezi zielonej

Teren po cięciu dojrzałych i starych drzewostanów iglastych. Głównymi gatunkami są żywotnik olbrzymi, choina zachodnia i dagleza zielona. Cedr zachowuje całe swoje listowie, podczas gdy choina zachodnia i dagleza tracą do 50% listowia. Bardzo duże ładunki połamanego i gnijącego drewna. Warstwa ściętego paliwa może sięgać od 0,5 do 2 m. Ziemia może być pokryta mchem albo tylko zwartym igliwem przykrytym dużą ilością odpadów powyrębowych. Warstwa organiczna jest od średnio głębokiej do głębokiej i jest zwarta. Mała bądź średnia ilość krzaków i ziół. Może występować ściółka.



Oprócz 16 typów paliw dla obszarów zadrzewionych wydzielono również 1 typ dla obszarów otwartych.

### Obszary otwarte

#### Typ paliwa **O-1a/b** Trawa

Ciągłe pokrycie trawą z nielicznymi pojedynczymi drzewami i grupami krzaków, które nie wpływają w zasadniczy sposób na zachowanie pożaru. Są dostępne dwa podtypy: dla matowej trawy świeżo po roztopach na wiosnę (O1-a) i dla stojącej martwej trawy w późnym lecie do wczesnej jesieni (O1-b). Proporcja między zdrowym i martwym materiałem w trawie ma znaczący wpływ na rozprzestrzenianie się pożaru, dlatego musi być wyznaczana z uwagą (*FBP Fuel Type Descriptions, G. Pelletier i in. 2012 oraz L.B. Nadeau i in. 2005*).

W kanadyjskim systemie nie ma zróżnicowania paliw liściastych ze względu na gatunki tworzące drzewostan ani na ich wiek. W rzeczywistych pożarach występują różnice w palności pomiędzy drzewostanami konkretnych gatunków liściastych oraz drzewostanami będącymi w różnych klasach wiekowych. Przykładowo dojrzały drzewostan bukowy z zamkniętym sklepieniem będzie bardziej odporny na ogień niż kohorta młodych brzoź. Jednakże różnice między poszczególnymi gatunkami liściastymi są mniejsze niż różnica między drzewostanami liściastymi i iglastymi. Stąd ograniczenie drzewostanów z udziałem co najmniej 80% drzew liściastych do dwóch typów D-1 i D-2.

Oprócz terenów porośniętych roślinnością w lesie znajdują się powierzchnie niepalne tj. drogi, wody powierzchniowe, budynki. Będą one stanowić barierę w rozprzestrzenianiu się ognia.

### 4.3 Typy paliwa w obszarze badawczym

W obszarze badawczym znajdują się tereny porośnięte roślinnością, w tym drzewostany, oraz powierzchnie niepalne takie jak wody powierzchniowe, budynki drogi. W pierwszym kroku, w zależności od rodzaju powierzchni przydzielamy obszary do 1 z 3 grup:

1. Niepalne, w tym rzeki, zbiorniki wodne, bagna, budynki, drogi publiczne, leśne i kolejowe. Drogi leśne są zazwyczaj pokryte piaskiem lub posiadają wyraźne niezarośnięte koleiny
2. Roślinność bezdrzewna, w tym łąki, pastwiska, tereny pod liniami energetycznymi i telekomunikacyjnymi (drzewa pod liniami są usuwane), rowy, poletka łowieckie, parkingi. Ten rodzaj powierzchni odpowiada roślinności trawiastej O-1
3. Drzewostany (typy paliwa C, D i M). Do tego rodzaju powierzchni zaliczamy drzewostany, parki, plantacje choinek, szkółki leśne, sady na roli, remizy (zadrzewienia i zakrzewienia). Mogą się do nich zaliczać również zadrzewienia na pastwisku, polach, łąkach, poletkach łowieckich, parkingach, sukcesje, tereny zdegradowane, halizny, obszary objęte szczególną ochroną, nieużytki pokopalniane, użytki ekologiczne. Zdarzają się na nich zadrzewienia i te tereny w zależności od dalszego opisu mogą być potraktowane jako drzewostan lub jako obszary trawiaste O-1. Bardzo otwarte drzewostany pod względem palnym przypominają trawy. Szczególny przypadek stanowią małe powierzchnie opisane jako skład drewna. Zostanie im przypisany typ S-3 ze względu na dużą ilość zbitego, martwego paliwa. Typ S przypisany jest również terenom po wycince z bardzo młodym zadrzewieniem.

Podczas przyporządkowania drzewostanu do jednego z 16 typów paliwa zadrzewionego trzeba uwzględnić wiele zmiennych, tj. skład gatunkowy i wiekowy, ciągłość i rozmieszczenie paliwa w przestrzeni, jego wysokość i gęstość oraz rodzaj siedliska. Zespoły roślinności prawie nigdy nie odpowiadają dokładnie opisom klas paliwa. Same opisy zawierają nieprecyzyjne sformułowania, jak zasobny, średniej gęstości. Dodatkowo przyporządkowujemy polskiej roślinności typy paliw stworzone w oparciu o kanadyjską florę. Przyporządkowanie polega na subiektywnym wyważeniu podobieństw i różnic i wybraniu typu paliwa najbardziej podobnego pod względem cech palnych do analizowanego drzewostanu.

W pracy skorzystano z doświadczenia kanadyjskiego zespołu opisującego paliwo w Brytyjskiej Kolumbii w 2015 r., który stworzył schemat klasyfikacji typów paliwa. Podczas tworzenia schematu zastosowano opisy typów paliwa, krzywe charakteryzujące predkość rozprzestrzeniania się pożaru w zależności od warunków meteorologicznych oraz parametry pożarów historycznych i pożarów doświadczalnych w różnych rodzajach roślinności. Dane historyczne pokazały, że zachowanie się pożaru nie zawsze odpowiada najbardziej oczywistemu typowi paliwa dla danego drzewostanu. Dlatego w schemacie pewnym zespołom roślinności przypisuje się inny niż według opisu typ paliwa, ale najbardziej pasujący ze względu na parametry obserwowanych w nim w przeszłości pożarów (*D.D.B. Perrakis i in., 2016*). Schemat zmodyfikowano, przystosowując go do warunków występujących na obszarze badawczym oraz do dostępności danych.

W pierwszym kroku rozróżniono drzewostany względnie jednorodne gatunkowo (dominacja jednego gatunku w ponad 80%) i drzewostany mieszane. W przypadku drzewostanów jednorodnych dalsze różnicowanie zależy od gatunku dominującego. Następnie uwzględnia się wiek drzewostanu, zwarcie, wysokość i siedlisko na jakim występuje.

W przypadku drzewostanów mieszanych należy wpierw ustalić procent drzew iglastych. Dalsze różnicowanie oparte jest na tych samych zmiennych, co w przypadku drzewostanów jednorodnych. Dodatkowo przy dużym udziale drzew iglastych uwzględnia się domieszki – drugi pod względem liczebności gatunek iglasty.

W drzewostanach mieszanych, którym przyporządkowano typ paliwa M, oprócz określenia procentowego udziału drzew iglastych, wyznacza się współczynnik korygujący, oparty o dominujący gatunek iglasty. Dzięki temu można uwzględnić mniejszą palność sosny i jodły względem świerka. Współczynnik jest poniżej jedności, redukuje procent drzew iglastych w drzewostanie.

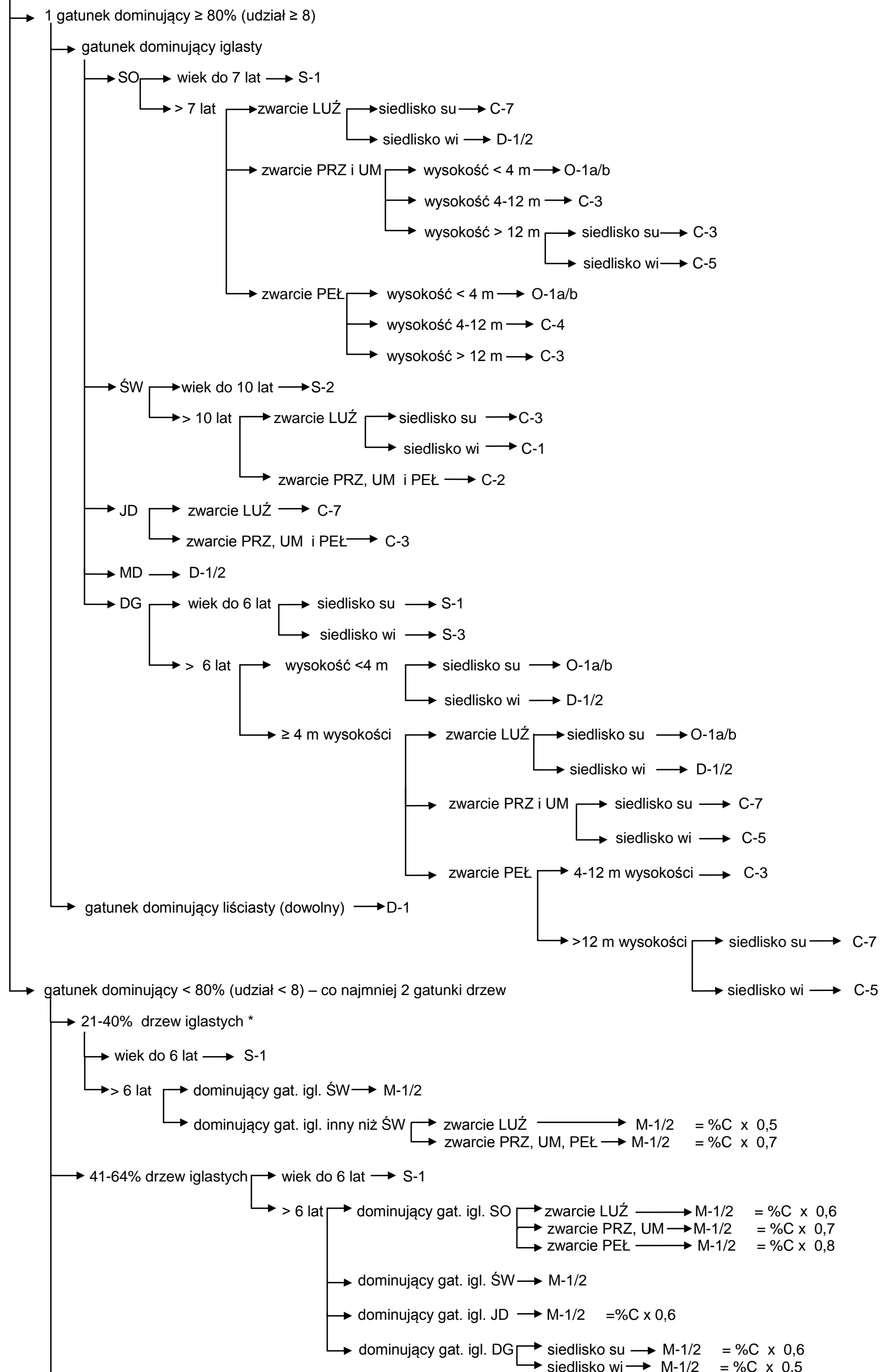
Udział procentowy drzew iglastych w paliwach mieszanych zaokrąglany jest do 5%.

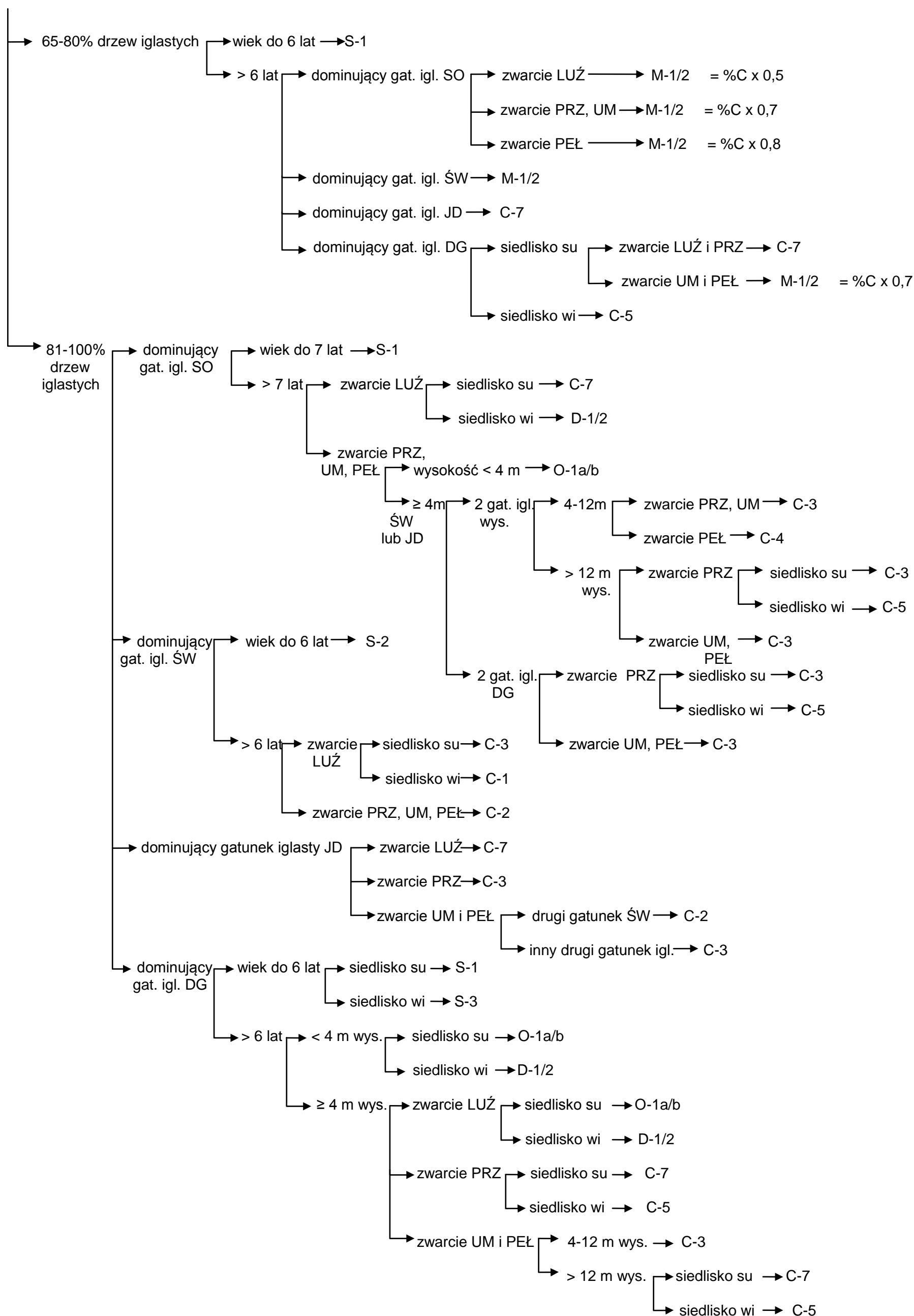
Przy wyznaczaniu udziału procentowego drzew iglastych w paliwach mieszanych typu M, modrzew ze względu na niską palność i utratę sezonową igliwia traktowany jest jak drzewo liściaste.

Schemat nr 4.1. szczegółowo przedstawia metodologie przyporządkowania typów paliwa dla LKP Lasy Spalsko Rogowskie.

**Schemat 4.1. Metodologia przyporządkowania typu paliwa (zmodyfikowany schemat według D.D.B. Perrakis i in., 2016)**

Roślinność zadrzewiona (>10% pokrycia drzewami)





\* modrzew jest traktowany jak gatunek liściasty

SO – sosna, ŚW – świerk, JD – jodła, MD – modrzew, DG – dąb; Zwarcie : LUŻ- luźne, PRZ – przerywane, UM – umiarkowane, PEŁ- pełne;  
Siedlisko: su – suche i świeże, wi – wilgotne i bagienne

### Modyfikacje schematu

Schemat został zaadoptowany do niniejszej pracy z uwzględnieniem różnic między gatunkami występującymi w Kanadzie i Polsce. Do analizy polskiego obszaru wybrano tylko te gatunki, które są najbardziej podobne pod względem budowy do gatunków występujących na obszarze badawczym. Dla sosny wybrano schemat opisujący grupę gatunków sosny Banksa i sosny wydmowej. Świerk został scharakteryzowany za pomocą gatunków świerk czarny i świerk biały, natomiast jodła za pomocą jodły górskiej. Przy wyborze odpowiedników polskich gatunków sugerowano się głównie wzrostem drzew. W obszarze badawczym jedynie 37 drzew wyższych od 30m. Maksymalna wysokość drzew wynosi 36 m. Oprócz tego porównano ogólną sylwetkę drzewa, wysokość podstawy korony i możliwość dotykania gałęziami dna lasu. Wykluczono ze schematu zasady stworzone z myślą o gatunkach nie występujących na obszarze badawczym, takich jak cedr.

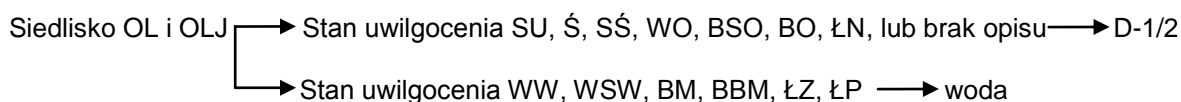
W schemacie należało pogodzić odmienny sposób klasyfikowania lasu. Kategorie używane przez kanadyjskich leśników nie zawsze pokrywają się z polskim sposobem inwentaryzowania drzewostanów. Dane pozyskane z nadleśnictw i LZD Rogów zawierają m.in. informacje o składzie gatunkowym warstwy drzew i podszytu, udziale poszczególnych gatunków, ich wieku, wysokości i pierścienicy. Są też informacje o rodzaju siedliska, uwilgoceniu, zwarcie drzewostanu i pokrywie gleby. Nie ma informacji o zamknięciu korony, która w istotny sposób wpływa na klasyfikację paliw w oryginalnym schemacie. W przystosowanym do potrzeb niniejszej pracy algorytmie klasyfikacji rolę zamknięcia korony przejmuje zwarcie – wskaźnik jest 4 stopniowy, dopuszcza wartości: luźne, przerywane, umiarkowane i pełne (Z. Świącicki i in., 2012). Za pomocą zwarcia można wnioskować o możliwości dotarcia światła do dna lasu, łatwości wietrzenia i parowania wody oraz możliwości rozprzestrzeniania się pożaru koronowego, a temu służył parametr zamknięcie korony.

Zwarcie zastępuje również w schemacie gęstość drzewostanu. W przypadku braku opisu dla atrybutu zwarcie, gęstość wnioskowana jest za pomocą parametru zadrzewienie. Jest to duże uproszczenie zastosowane z powodu braku innych indykatorów gęstości. Zadrzewienie to stosunek masy drzewnej istniejącej w drzewostanie do maksymalnej masy drzewnej w danym wieku i na danym siedlisku według tablic zasobności. Przyjęto, że zadrzewienie od 0-0,25 odpowiada zwarcia luźnemu, powyżej 0,25 do 0,5 zwarcia przerywanemu, powyżej 0,5 do 0,75 zwarcia umiarkowanemu i powyżej 0,75 zwarcia pełnemu.

Kanadyjski system typowania paliwa stosuje jako jedno z kryteriów przynależność do ekoregionów. Ekoregiony łączone są w grupy środowisk mokrych i suchych. Ich rolę w schemacie przejmą siedliska. Siedliska wilgotne i bagienne będą odpowiadać ekoregionom mokrym, zaś siedliska suche i świeże – ekoregionom suchym. Informacją pomocniczą jest uwilgocenie siedliska. Niestety jest to dana scharakteryzowana tylko w części wydzielen leśnych.

W sposób szczególny potraktowano siedliska olsu i olsu jesionowego. Można w nich spotkać okresowe lub stałe podtopienia, przez co obszary te są nieaktywne podczas pożarów. Jeśli dodatkowy atrybut – stan uwilgocenia wskazuje na wysoki poziom wilgotności, siedliska te są traktowane jak bagno (woda). W przypadku zastosowania odwodnienia lub występowania suchszych odmian siedliska wydzielenie jest przypisywane do typu paliwa liściastego D-1, charakteryzującego się małymi prędkościami rozprzestrzeniania się i małą ostrością pożaru. Odpowiada to zarówno warunkom palnym w przeważnie występującym drzewostanie liściastym, jak i rzadkim przypadkom drzewostanów z dużym udziałem gatunków iglastych, które na olsach występują w zwarcu luźnym i przerywanym i są ciągle mniej palne w porównaniu z innymi siedliskami.

#### **Schemat 4.2. Metodologia przyporządkowania typu paliwa siedliskom olszowym**



OL - ols, OLJ – ols jesionowy; Stan uwilgocenia: SU - suche, Ś - świeże, SŚ - silnie świeże, WO – wilgotne odwodnione, BSO – bagienne silnie odwodnione, BO- bagienne odwodnione, ŁN – łęgowe niezalewane, WW – wilgotne, WSW – wilgotne silnie wilgotne, BM – bagienne mokre, BBM – bagienne bardzo mokre, ŁZ – łęgowe zalewane, ŁP- łęgowe zalewane i podtapiane

W inwentaryzacji nie ma informacji o masie uschłych drzew stojących lub leżących, więc klasy paliwa M3 i M4 nie będą w schemacie uwzględniane. Z powodu braku danych zrezygnowano również z sekcji poświęconej drzewostanom zniszczonym przez plagę szkodników.

Tak przypisane typy paliwa będą obowiązywały dla całego okresu symulacji. Przyjęto założenie stałości paliwa, by skupić się na badaniu wpływu czynnika klimatycznego na reżim pożarowy. Jest to uproszczenie i należy zdawać sobie sprawę, że w prawdziwym drzewostanie drzewa będą się starzeć, a ponadto będą zachodzić procesy sukcesji oraz

zakłócenia naturalne i sztuczne zmieniające skład gatunkowy i wiekowy. Skład gatunkowy może być świadomie przebudowywany, ale trudno przewidzieć, czy będzie zwiększony nacisk na ochronę przyrody czy na ekonomiczne pozyskanie drewna i co za tym idzie, jakie gatunki będą w przyszłości przez leśników preferowane. Możliwa jest również zmiana składu na skutek zwiększenia liczby drzew gatunków inwazyjnych, wypadanie pewnych gatunków w wyniku plagi chorób lub insektów powiększających obszar występowania na skutek zmian klimatycznych. W przyszłości oprócz stanu gatunkowego i wiekowego lasu będą zmieniać się też stosunki wodne, zasobność wód podziemnych i ich płytkość.

Przyjęciu założenia stałości paliwa sprzyjają regularna wycinka i zabiegi leśne, które stabilizują skład wiekowy w skali całego lasu.

### Wyniki klasyfikacji

W klasyfikacji wzięło udział 11348 wydzielen leśnych nadleśnictwa Brzeziny, nadleśnictwa Spała i LZD Rogów. W 44,4% przypadków stwierdzono typ paliwa C-3 (dojrzały drzewostan sosnowy), co odpowiada ponad połowie powierzchni obszaru badawczego (53,9%). Najwięcej paliwa typu C-3 znajduje się w nadleśnictwie Spała – łącznie 9864,1 ha (63,5% powierzchni nadleśnictwa). Udział paliwa C-3 w nadleśnictwie Brzeziny wynosi 50,9%, a w LZD Rogów zaledwie 26,6%.

Wysoki udział paliwa zawierającego sosnę spowodowany jest nasadzeniowym charakterem lasów oraz piaszczystymi glebami niskiej jakości. Występowanie paliwa typu C-3 jest związane z rodzajem siedliska. Aż 99,3% obszaru występowania paliwa typu C-3 znajduje się na siedliskach świeżych i w zaledwie 0,3% na siedliskach wilgotnych.

Następnym pod względem zajmowanej powierzchni typem paliwa jest D-1 (drzewostan liściasty) zajmujący 21,1 % powierzchni LKP Lasy Spalsko Rogowskie. Największy udział drzew liściastych występuje w LZD Rogów (40,6% powierzchni). W nadleśnictwach powierzchniowy udział drzew liściastych wynosi odpowiednio 23,5 % dla nad. Brzeziny i 14,2% dla nad. Spała.

Trzecią najliczniejszą grupę paliw stanowią paliwa typu M-1 z różnym udziałem drzew iglastych (15,4% powierzchni). Pozostałe typy paliw mają udziały w powierzchni poniżej 2%.



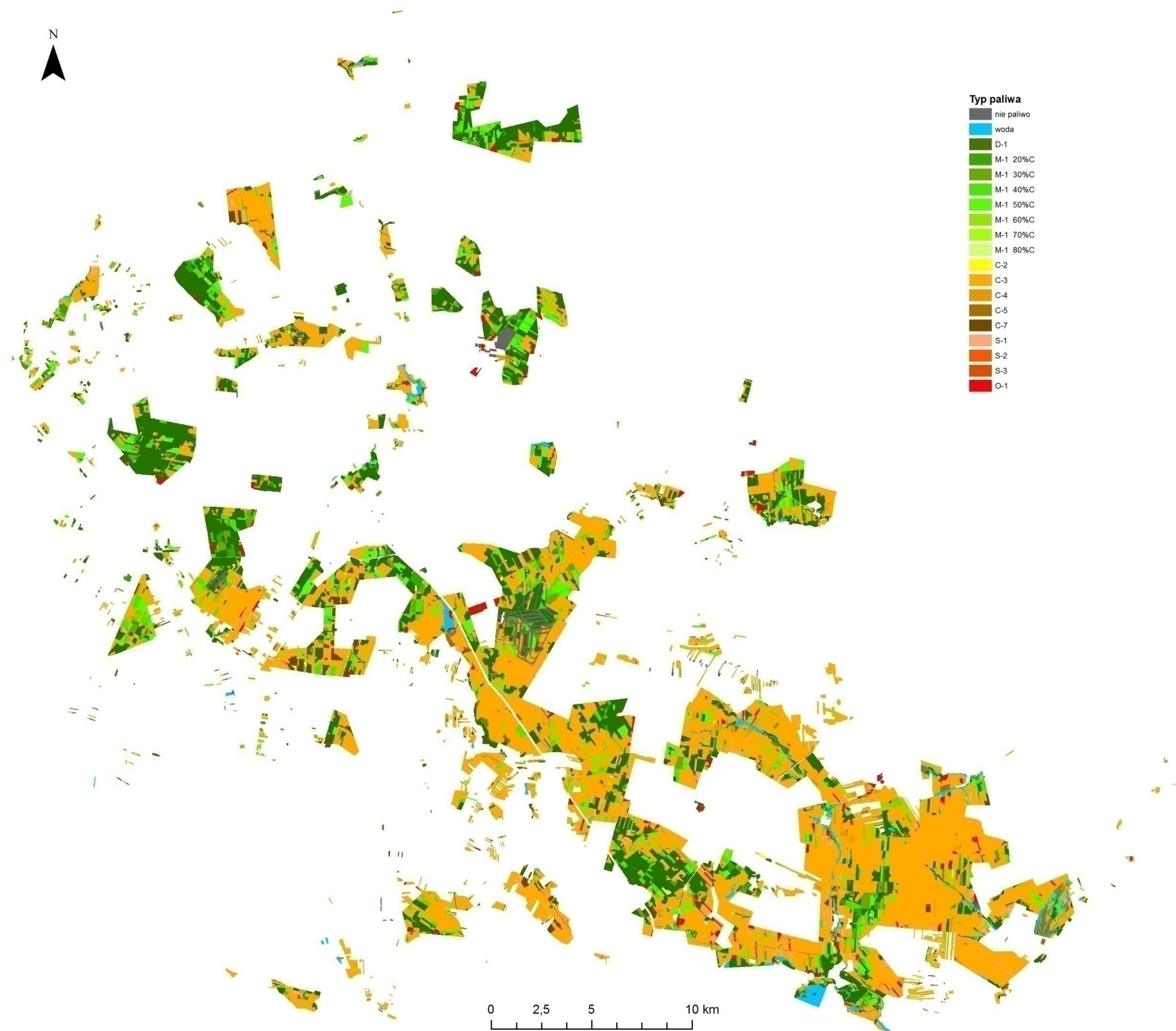
Nie stwierdzono występowania typu C-1 lasu świerkowego z porostami. Porosty mają istotny wpływ na palność tylko, gdy występują w bardzo dużej ilości (G. Pelletier i in., 2009).

Na etapie tworzenia schematu wykluczono możliwość występowania paliwa typu C-6, plantacja iglasta. Właściwości palne zbiorowiska drzew iglastych lepiej oddają pozostałe typy z grupy C. Liczbę wydzieli i powierzchnię typów paliwa szczegółowo przedstawia tabela 4.2.

Tabela 4.2. Zestawienie typów paliw w LKP Lasy Spalsko Rogowskie z podziałem na poszczególne leśnictwa i LZD Rogów.

Typ paliwa	Nadleśnictwo Brzeziny		Nadleśnictwo Spała		LZD Rogów		LKP Lasy Spalsko Rogowskie	
	ilość wydziałów	powierzchnia [ha]	ilość wydziałów	powierzchnia [ha]	ilość wydziałów	powierzchnia [ha]	ilość wydziałów	powierzchnia [ha]
<b>C-1</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>C-2</b>	23	21,69	12	16,82	13	15	48	53,33
<b>C-3</b>	2242	7966,43	2520	9864,12	275	975	5037	18805,66
<b>C-4</b>	97	135,17	144	351,11	23	56,80	264	543,08
<b>C-5</b>	24	65,58	67	154,79	1	1,80	92	222,17
<b>C-6</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>C-7</b>	105	405,86	20	62,69	4	3,00	129	471,54
<b>D-1</b>	1301	3679,39	761	2201,12	453	1491	2515	7371,93
<b>M-1</b>	789	2730,10	575	1762,12	300	892,94	1664	5385,17
<b>S-1</b>	66	144,36	170	356,27	6	12,57	242	513,20
<b>S-2</b>	-	-	-	-	1	0,34	1	0,34
<b>S-3</b>	5	3,72	6	3,98			11	7,70
<b>O-1</b>	320	191,67	279	298,92	68	102	667	592,48
<b>woda</b>	83	114,22	294	440,15	26	48,92	403	603,29
<b>nie paliwo</b>	177	207,72	57	18,98	41	72,67	275	299,37

Mapa 4.2. Typy paliwa na obszarze LKP  
Lasy Spalsko Rogowskie



Typ paliwa C-3 należy wraz z typem C-2 do paliw o najwyższych wskaźnikach prędkości rozprzestrzeniania się pożaru w roślinności zadrzewionej. Paliwa te uznawane są za bardziej palne w porównaniu z drzewostanami liściastymi i mieszanymi oraz drzewostanami pozostałych typów paliw iglastych, pod warunkiem braku występowania skrajnie suchych warunków. Jednakże w okresie historycznym nie stwierdzono znacząco większej liczby pożarów i powierzchni spalonej na terenie występowania paliwa typu C-3.

Na obszarze występowania typu paliwa C-3, który stanowi 53,9 % powierzchni LKP Lasy Spalsko Rogowskie w okresie historycznym 1989-2016 miało miejsce 54,1% pożarów, co daje 43,7% powierzchni spalonej w tym czasie. Również rozkład wielkości pożarów nie różni się w istotny sposób od statystyki dla całego obszaru. Na terenie występowania paliwa typu C-3 miało miejsce 51,1% pożarów średnich i 50% pożarów dużych.

## **5. Model pożarowy i jego weryfikacja**

W pracy skorzystano z symulacji wykonanych za pomocą oprogramowania modelującego powstawanie i rozprzestrzenianie się pożarów Prometheus. Program Prometheus powstał w narodowym projekcie kanadyjskim, który pod egidą Kanadyjskiego Centrum Pożarów Leśnych, współtworzyło wiele instytucji, w tym agencje rządowe i kilka uniwersytetów. Prometheus jest deterministycznym modelem symulacji wzrostu pożarów opartym na parametrach pogodowo pożarowych, topografii i zróżnicowanym przestrzennie paliwie. Jest częścią kanadyjskiego systemu określania zagrożenia pożarowego i wykorzystuje indeks pogodowo-pożarowy FWI (Fire Weather Index) stosowany w tym systemie. W skład FWI wchodzi:

















- Kod wilgotności paliwa (FFMC)
- Kod wilgotności ściółki (DMC)
- Kod suszy (DC)
- Indeks początkowego rozprzestrzeniania się pożaru (ISI)
- Indeks pionowego rozprzestrzeniania się pożaru (BUI)
- Indeks pogody pożarowej (FWI)

*(C.E. Wagner 1987, J. Podur i in. 2010)*

Program modeluje powstanie i zachowanie się pożaru w poszczególnych oknach siatki i wybranych krokach czasowych. Dla każdego aktywnego wierzchołka siatki obliczane jest tempo rozprzestrzeniania się pożaru w podstawowych kierunkach, z użyciem równań kanadyjskiego systemu przeciwpożarowego FBP (Fire Behaviour Prediction) wykorzystujących informację o paliwie, pogodzie i dane topograficzne. Do oszacowania prędkości rozprzestrzeniania się pożaru Prometheus stosuje zasadę propagacji fali Huygens’a, według której każdy punkt na froncie fali jest źródłem nowej fali i jest opisany jako nowy front fali. Powierzchnia wypadkowa frontu jest wypadkową interferencji fal składowych.

W homogenicznym środowisku ze stałym wiatrem rozwój pożaru ma kształt elipsy od punktu zapłonu. Bez wiatru przybiera kształt koła. Dzięki analizom terenów spalonych zmodyfikowano kształty do podwójnej elipsy w obszarach homogenicznych i kształtu łzy w obszarach heterogenicznych.

Model ma zastosowanie dla obszarów średniej wielkości od kilkudziesięciu do kilkuset ha. (C. Tymstra i in. 2010).

C-2		C-7		M-2		O-1a	
C-3		D-1		S-1		O-1b	
C-4		D-2		S-2		Nie paliwo	
C-5		M-1		S-3		woda	

Rysunek. 5.1. Oznaczenia typów paliw stosowane w programie Prometheus

### Dane wejściowe

Do modelu wprowadzane są następujące rodzaje danych:

1. Dane przestrzenne o paliwie
2. Dane o topografii terenu
3. Dane o barierach rozprzestrzeniania się ognia
4. Dane meteorologiczne
5. Dane o źródle zapłonu

Ad. 1 Dane przestrzenne o paliwie- przyporządkowany do danego składu gatunkowego i wiekowego oraz rodzaju siedliska typ paliwa z kanadyjskiego systemu przeciwpożarowego odpowiadający najlepiej pod względem właściwości palnych i prędkości rozprzestrzeniania

się pożaru. Każdemu z 11348 wydzieleń leśnych obszaru badawczego został przypisany typ paliwa za pomocą algorytmu opisanego w rozdziale II. Zakłada się, że na poszczególnym wydzieleniu paliwo poziomo ma charakter homogeniczny.

Program modelujący dopuszcza możliwość występowania 2 faz wegetacyjnych: z liśćmi i bez liści dla paliw liściastych typu D i paliw mieszanych typu M oraz występowania fazy suchej trawy odpowiadającej okresowi zimowemu i wczesnowiosennemu i trawy świeżej – stojącej i zdolnej do magazynowania wilgoci w tkankach. Początek i koniec fazy „ulistnionej”, zwanej inaczej zieloną, może różnić się ze względu na gatunek, obszar i warunki meteorologiczne panujące w poszczególnych latach. Dla potrzeb niniejszej pracy przyjęto czas trwania fazy zielonej od kwietnia do października włącznie.

Dane o paliwie wprowadzane są do modelu w postaci rastów o rozdzielczości 10 m. W projektach używana będzie projekcja Transverse Mercator, system ETRS\_1989\_Poland\_CS92.

Ad. 2 Dane o topografii terenu, zawierające informacje o wysokości n.p.m., pochodzą z zasobów Głównego Urzędu Geodezji i Kartografii. Miały rozdzielczość 24,5m x 24,5m i zostały przeliczone do rozdzielczości 10 m.

Na ich podstawie Prometheus tworzy warstwy z informacjami o stopniu i kierunku nachylenia terenu. Wszelkie dane topograficzne są w postaci rastów, odpowiadających rozdzielczości wcześniej wspomnianej warstwy z paliwem, w tym wypadku wynoszącej 10 m.

Ad. 3 Dane o barierach rozprzestrzeniania się ognia. Wewnątrz lasu występują powierzchnie niepalne tj. tory, drogi, budynki oraz wody powierzchniowe. Są one wprowadzone do programu w postaci danych wektorowych.

Dane o sieci kolejowej przechodzącej przez obszar badawczy pochodzą z Bazy Danych Topograficznych BDOT10k Urzędu Marszałkowskiego Województwa Łódzkiego. W obszarze badawczym występują linie jedno i dwutorowe. Szerokości skrajni budowli torowisk (części niepalnych) przyjęto według Rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 10 września 1998 r. w sprawie warunków technicznych, jakim

powinny odpowiadać budowie kolejowe i ich usytuowanie. Według przekroji normalnych toru przyjęto dla linii jednotorowych szerokość 6,65 m i dla linii dwutorowych 11 m.

Na obszarze zlokalizowane są nieliczne obiekty budowlane, których położenie i wymiary pozyskano z bazy BDOT10k i zastosowano jako przerwę paliwową.

Dane o wodach powierzchniowych pochodzą również z powyższej bazy danych. Obejmują informacje o wymiarach zbiorników wodnych i szerokościach odcinków rzek. Informacja o rzekach uzupełniona jest danymi na temat małych dopływów i odcinków źródłowych cieków o szerokości do 1 m pochodzącymi z Mapy Podziału Hydrograficznego Polski.

Dane o drogach pochodzą z zasobu Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Łodzi oraz Leśnego Zakładu Doświadczalnego w Rogowie, SGGW w Warszawie. Zawierają one informacje o drogach publicznych, drogach leśnych, ścieżkach, liniach podziału przestrzennego, liniach projektowanych i drogach innych przechodzących przez obszar badawczy. Jest to łącznie 7608 odcinków. Jako przerwy paliwowe należy uwzględnić tylko te posiadające nawierzchnię niepalną uniemożliwiającą propagację ognia. Porównano opis dróg z rzeczywistością podczas wielokrotnych wizyt terenowych na terenie Lasu Wiączyńskiego należącego do obszaru badawczego. Zdecydowano się odrzucić drogi sklasyfikowane jako ścieżki, które są często porośnięte trawą. Odrzucono również drogi projektowane oraz drogi o szerokości poniżej 4 m. Drogi od 4 m wzwyż są wykorzystywane do ruchu pojazdów i są zazwyczaj pokryte piachem lub tłuczniem. Drogi publiczne przecinające obszar badawczy pokryte są asfaltem.

Drogi zostały wprowadzone w postaci wektorów liniowych z zaznaczeniem ich szerokości. Reszta danych została wprowadzona w postaci poligonów odpowiadających ich wymiarom.

Gdy symulowany pożar napotyka przerwę paliwową, stykające się z nią wierzchołki poligonu stają się nieaktywne. Front pożaru rozplywa się na przeszkodzie na dwie strony. Pożar może również przeskoczyć lukę paliwową i kontynuować pożar za nią. Jest to możliwe gdy oszacowana długość płomieni wynosi co najmniej 1,5 szerokości przeszkody. Wielkość płomieni będzie zależała od intensywności pożaru i prędkości wiatru.

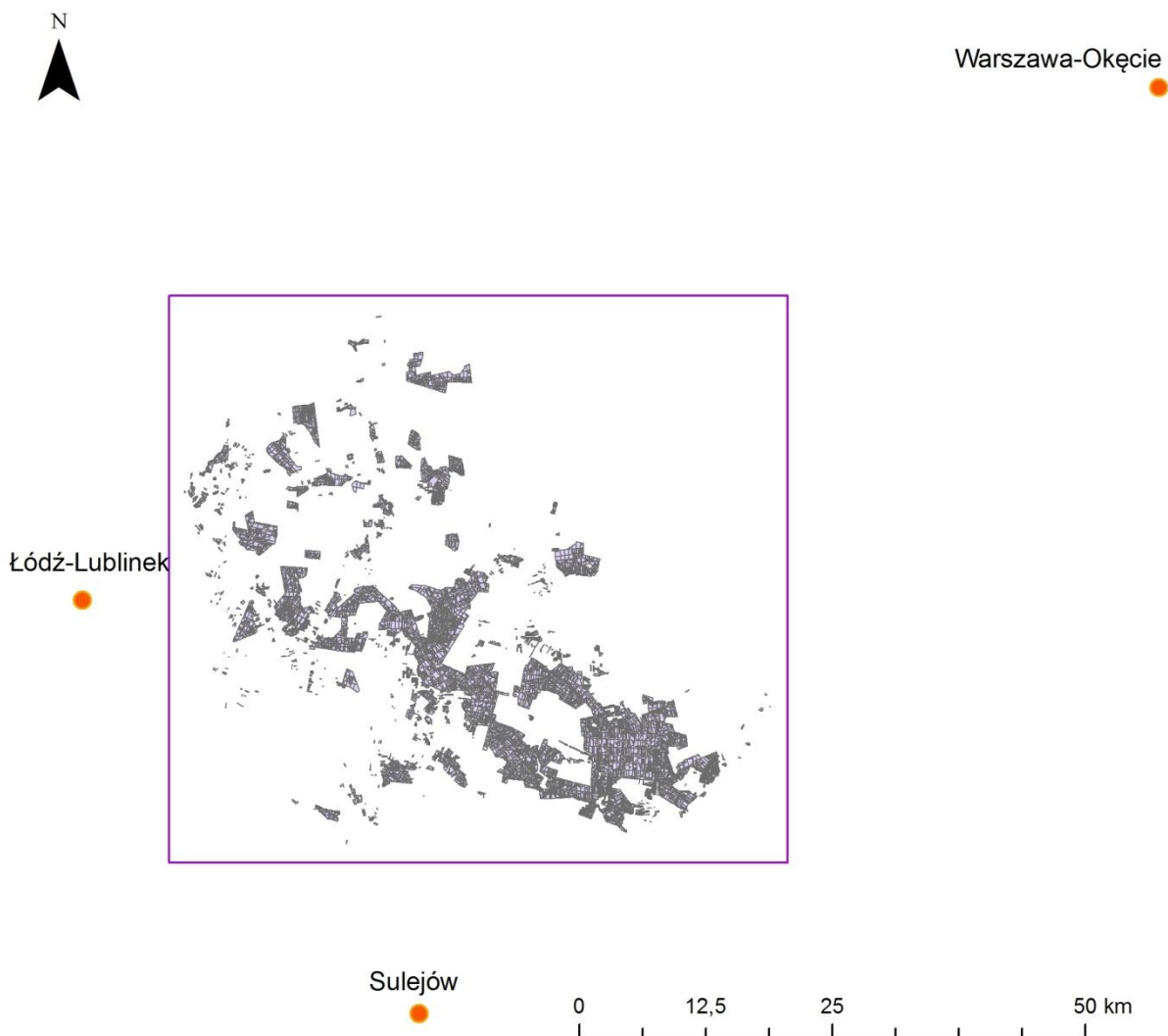
Przerwy paliwowe są wykluczane ze statystyki spalonego obszaru (*C. Tymstra i in., 2010*).

#### Ad. 4 Dane meteorologiczne

Model wykorzystuje następujące dane meteorologiczne: temperaturę, wilgotność względną, prędkość i kierunek wiatru oraz opad. Do weryfikacji modelu wykorzystano dane meteorologiczne pochodzące z 3 stacji Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej:

- Stacji Łódź – Lublinek
- Stacji Sulejów
- Stacji Warszawa – Okęcie

Stacja Sulejów została zadeklarowana jako źródło głównego strumienia danych meteo, ze względu na to iż jest to stacja pozamiejska i najlepiej odpowiada warunkom panującym w obszarze badawczym położonym niemal w całości poza ośrodkami miejskimi. Ponadto większość obszaru badawczego znajduje się w bliższym sąsiedztwie tej stacji.



Mapa 5.1. Lokalizacja stacji meteorologicznych



Do weryfikacji modelu wykorzystano serie meteorologiczne z lat 1989-2013. Rozdzielczość czasowa danych do roku 1993 wynosi trzy godziny. Program Prometheus interpoluje je do serii godzinnych. Po 1993 dane z IMGW są już z rozdzielczością godzinową. Wyjątek stanowią dane o opadzie, które w całym okresie są całodobowe. Program przyporządkowuje opad domyślnie do godziny 13. Rozkład opadu w ciągu godziny program traktuje jako równomierny.

Dzięki wykorzystaniu 3 stacji meteorologicznych i danych topograficznych dane są interpolowane przestrzennie. Przy interpolacji uwzględniana jest różnica w wysokości nad poziomem morza.

#### Założenia wejściowe

1. W badaniach nie uwzględnia się otoczenia obszaru, które stanowi mozaikę zabudowy, pól uprawnych, łąk i lasów prywatnych, jest więc w dużej części palne. Statystyka pożarów historycznych oraz symulowanych pożarów w przyszłości odnosi się wyłącznie do obszaru Leśnego Kompleksu Promocyjnego Lasy Spalsko Rogowskie. Nie uwzględnia się również innych palnych obiektów z najbliższego sąsiedztwa obszaru, jak baza paliw płynnych w Koluszkach przy ul. Naftowej, znajdująca się w bezpośrednim sąsiedztwie wydzielania 06-02-1-03-144-b-99. Baza posiada 27 zbiorników naziemnych z paliwem płynnym. Ich udział w ewentualnym pożarze znacząco wpłynął by na rozmiary i ostrość pożaru. Ten aspekt ryzyka pożarowego nie jest przedmiotem opracowania i zbiorniki nie będą brały udziału w modelowaniu.
2. Maksymalny czas poszczególnych symulacji ustawiono na 3 dni. Jest to najdłuższy czas trwania pożaru historycznego. Po tym czasie mały pożar zostanie opanowany. Większy pożar z dużym prawdopodobieństwem osiągnie w tym czasie swój maksymalny rozmiar ograniczony przerwami paliwowymi albo wyjdzie poza obszar badawczy.
3. Powierzchnie spalone we wcześniejszych symulacjach nie są lukami paliwa w kolejnych. Część roślinności nie ulega spaleniowi podczas pożaru. Ponadto zachodzą procesy regeneracji. Jest to uproszczenie, gdyż w rzeczywistości niedawno spalone powierzchnie mogą zatrzymywać kolejne pożary.

Przed rozpoczęciem symulacji należy podjąć decyzję o sposobie wyznaczania kodu wilgotności paliwa FFMC. Wilgotność paliwa zmienia się w cyklu dobowym w oparciu o parametry atmosferyczne. W programie dostępne są dwie metody obliczania FFMC: metoda i Lawsona i Van Wagnera.

Metoda Lawsona opiera się na analizie danych z serii doświadczalnej godzinnych pomiarów wilgotności paliwa. Wyniki wskazują na cykliczne zmiany dobowe wilgotności z fazą popołudniowego wysychania i nocną fazę odzyskiwania wilgotności. Według metody Lawsona kod wilgotności paliwa obliczany jest za pomocą FFMC z dnia poprzedniego i wilgotności względnej z porannej fazy. Do wyznaczenia danych godzinowych wykorzystuje się uzyskany doświadczalnie rozkład dobowy wskaźnika. Wskaźnik jest zdeterminowany na następne 24 godziny licząc od solarnego południa. Jest on bardziej zmienny w ciągu doby, lecz charakteryzuje się brakiem reakcji na opad aż do następnego południa.

Metoda Van Wagnera również wykorzystuje do obliczeń kod wilgotności paliwa z dnia poprzedniego, lecz do obliczeń godzinowych stosuje godzinowe serie parametrów meteorologicznych. Jednakże przy braku opadów w ciągu dnia amplituda obliczonej tą metodą wartości godzinnej FFMC jest mała, krzywa wartości jest wówczas płaska. Może to skutkować w suchych okresach nadmiernym przyrostem pożarów w porze nocnej (*C. Tymstra i in., 2010*).

Obie metody mają swoje zalety i wady dlatego sprawdzono ich adekwatność dla pożarów historycznych obszaru badawczego. W tym celu wybrano pożary z 3 lat z początku, środka i końca analizowanego okresu historycznego i ekstrema pożarowe z całego 25-lecia i porównano powierzchnie spalone z użyciem obu metod. W analizie wzięto pod uwagę rekordowy po względem liczby pożarów i spalonej powierzchni rok 1992 oraz lata 1998 i 2012. Porównanie dokonane było dla pożarów powstałych w czasie pożaru rzeczywistego. Pożary historyczne bez danych o czasie zakończenia akcji gaśniczej zostały wykluczone z analizy. Łącznie porównano symulowane powierzchnie spalone dwoma metodami dla 66 pożarów, co stanowi blisko 10% wszystkich pożarów z okresu historycznego.

Tabela 5.1 Porównanie powierzchni spalonych w czasie pożaru w rzeczywistości i w 2 symulacjach, przeprowadzonych z wyznaczeniem kodu wilgotności paliwa metodą Van Wagnera i Lawsona.

L.p.	Data pożaru	Czas trwania [h]	Rzeczywista powierzchnia spalona [ha]	Powierzchnia z symulacji z użyciem metody Van Wagnera [ha]	Powierzchnia z symulacji z użyciem metody Lawsona [ha]	Metoda bliższa rzeczywistej wartości W/L
1	1992-03-01	01:10	0,500	0	0	-
2	1992-05-23	02:40	1,000	0,16	0,2	L
3	1992-05-24	02:10	0,170	1,33	2,2	W
4	1992-06-03	01:00	0,020	0,54	0,3	L
5	1992-06-04	00:40	0,300	0,5	0,91	W
6	1992-06-06	00:40	0,200	0,56	0,9	W
7	1992-06-07	00:40	0,800	0,53	0,52	W
8	1992-06-29	06:50	2,000	0	0	-
9	1992-07-01	08:10	0,900	1,9	2,28	W
10	1992-07-04	01:40	0,040	0	0	-
11	1992-07-17	00:40	0,020	0,13	0,14	W
12	1992-07-21	05:30	1,000	0	0	-
13	1992-08-01	01:40	0,100	0,15	0,92	W
14	1992-08-01	01:30	0,100	0,04	0,21	W
15	1992-08-01	01:25	0,050	0,36	2,15	W
16	1992-08-03	00:50	0,020	0,01	0,03	-
17	1992-08-03	03:00	1,000	0,21	0,7	L
18	1992-08-28	00:50	0,003	1,66	1,98	W
19	1992-08-29	72:20	100,000	70,88	70,89	L
20	1992-08-30	01:40	0,020	0,33	0,12	L
21	1992-09-05	01:30	0,030	0	0	-
22	1996-04-22	03:45	10,000	0	0	-
23	1997-04-24	02:25	9,000	2,03	2,64	L
24	1998-04-04	01:45	1,900	0	0	-
25	1998-04-28	01:25	0,500	3,19	5,49	W
26	1998-05-11	01:05	0,300	0	0	-
27	1998-05-11	01:50	0,800	0,38	1,39	W
28	1998-05-11	03:00	1,400	1,29	5,03	W
29	1998-05-20	00:45	0,100	0	0	-
30	1998-06-03	02:20	0,200	0	0	-
31	1998-06-03	00:30	0,060	0	0	-
32	1998-06-23	00:45	0,200	0	0	-
33	1998-08-17	00:45	0,010	0	0	-
34	1998-10-05	00:36	0,010	0	0	-
35	1998-11-03	08:35	0,011	0	0	-
36	2009-04-26	08:41	6,000	23,53	35,22	W
37	2009-04-27	09:51	5,000	37,63	39,31	W
38	2012-03-16	00:55	0,050	0,05	0,05	-

39	2012-03-17	03:01	8,920	0,05	0,05	-
40	2012-03-17	02:30	0,420	1,31	3,13	W
41	2012-03-19	03:30	0,650	0,16	0,39	L
42	2012-03-20	00:17	0,500	0	0,01	L
43	2012-03-23	01:10	0,050	0	0,03	L
44	2012-03-23	01:10	0,100	0	0,07	L
45	2012-03-23	01:10	0,100	0	0,07	L
46	2012-03-27	04:15	0,150	0,91	1,55	L
47	2012-04-09	00:33	2,000	0	0	-
48	2012-04-12	01:17	0,120	0	0	-
49	2012-04-13	00:17	0,010	0	0	-
50	2012-04-20	00:42	2,000	0	0	-
51	2012-04-22	00:21	1,000	0	0	-
52	2012-04-28	00:39	0,300	0,1	0,05	W
53	2012-04-28	00:32	1,000	0,75	0,78	L
54	2012-04-28	01:32	0,300	3,97	8,99	W
55	2012-05-03	01:30	1,200	0	0	-
56	2012-05-24	02:09	0,500	7,67	20,73	W
57	2012-05-31	00:38	0,200	0	0	-
58	2012-05-31	00:40	0,030	0,03	0	W
59	2012-06-04	00:31	0,002	0	0	-
60	2012-06-12	00:20	0,015	0	0	-
61	2012-06-27	01:14	0,050	0,06	0,17	W
62	2012-07-03	00:23	0,005	0	0	-
63	2012-08-03	01:04	0,300	0	0	-
64	2012-10-03	01:21	0,010	0	0	-
65	2012-10-04	00:33	0,020	0	0	-
66	2012-10-04	00:33	0,010	0	0	-

Tabela pokazuje zestawienie otrzymanych powierzchni dla zadeklarowanego w raportach czasu pożaru. W ostatniej kolumnie porównano, która z metod jest bliższa wyniku rzeczywistego.

Porównanie wykazało brak drastycznych różnic między obiema metodami. Często o przewadze jednej metody nad drugą decydują setne części hektara. Metoda Lawsons w większości przypadków daje większe powierzchnie spalone niż metoda van Wagnera. Przewagą 21 do 13 prowadzi metoda obliczeń kodu wilgotności paliwa metodą Van Wagnera. Obie metody dają podobny wynik w przypadku największego pożaru w okresie historycznym, w którym spłonęło 100 ha. Obie go nie doszacowują. Różnica między nimi jest minimalna, rzędu 0,01 ha.

Metoda Van Wagnera została wybrana do symulacji pożarów z okresu historycznego i pożarów prognozowanych w przyszłości.

### Wyniki symulacji dla pożarów z okresu 1989-2013

Symulacje pożarów przeprowadzono dla 672 zdarzeń z obszaru badawczego, które miały miejsce w latach 1989-2013. Jeden pożar został wykluczony z symulacji ze względu na brak dokładnej daty i co za tym idzie odpowiadających mu warunków meteorologicznych.

Weryfikacja symulacji modelu możliwa jest jedynie dla tych pożarów historycznych, które posiadają informację zarówno o powierzchni spalonej jak i czasie pożaru. Czas zdarzenia w symulacji został zaokrąglony do przedziałów 20 minutowych w jakich raportowane są postępy pożarów w programie.

Liczba pożarów, dla których można było porównywać powierzchnię spaloną w tym samym czasie wynosiła 518 zdarzeń o łącznej powierzchni spalonej 348,01 ha. Analogiczna powierzchnia spalona w odpowiadających im symulacjach komputerowych wyniosła 717,64 ha, co stanowi 206,2% wartości rzeczywistej.

Podczas symulacji stwierdzono brak pożaru dla 97 zdarzeń, co odpowiada 14,4% raportowanych pożarów. Aż 83,5% z nich to pożary mające swój początek w paliwie liściastym typu D-1/2. Świadczy to o zbyt rygorystycznych warunkach jakie model stawia możliwości zaistnienia pożaru w drzewostanie liściastym.

W pojedynczych symulacjach idealna zgodność powierzchni występuje rzadko. Zazwyczaj jednak są to wartości tego samego rzędu lub poniżej 1 ha. Największą zgodność wykazują pożary małe. Pożary średnie, duże i bardzo duże są częściej niedoszacowane.

Program z jednej strony ma tendencje do zawyżania ogólnej powierzchni spalonej, z drugiej jest bardziej rygorystyczny pod względem spełnienia warunków koniecznych do zaistnienia pożaru.

Należy pamiętać, że na wyniki modelowania mają wpływ:

1. Brak supresji – akcje gaśnicze nie są w żaden sposób symulowane w programie. Prometheus pokazuje rozwój pożaru bez ingerencji ludzkiej, co w rzeczywistości nie występuje w obszarze badawczym. Symulowane powierzchnie mogą być większe.

2. Nie znany jest czas detekcji pożaru. Początkowa faza pożaru może przez dłuższy czas przebiegać bardzo powoli i nie być zauważona. Początek pożaru w raportach Straży Pożarnej to czas przyjęcia zgłoszenia. Pożary z XX wieku dodatkowo były zgłaszane później ze względu na trudniejszy dostęp do telefonu. Porównując więc powierzchnię spaloną z symulacji, która zaczyna się w momencie zaistnienia źródła zapłonu nie mamy pewności, czy analizujemy pożary z tego samego czasu.
3. Część pożarów w przeszłości miała miejsce w wyniku celowego podpalenia, z użyciem dodatkowych środków palnych.
4. Typy paliwa zostały sklasyfikowane za pomocą najnowszych inwentaryzacji leśnych. Skład paliwa w przeszłości mógł się różnić gatunkowo i wiekowo.
5. Symulacje nie uwzględniają otoczenia obszaru, przez które pożar może się rozprzestrzeniać

W celu weryfikacji modelu zastosowano podejście grupujące pożary do grup wielkości według Rozporządzenia Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji w sprawie szczegółowych zasad organizacji krajowego systemu ratowniczo-gaśniczego (Dz. U. z 1999 nr 111 poz. 1311). Rozporządzenie dzieli pożary leśne na:

- małe, < 1 ha,
- średnie, 1,01 – 10 ha,
- duże, 10,01 – 100 ha,
- bardzo duże, >100 ha.

Porównanie grup wielkości dla 518 pożarów wykazało 67,2 % zgodność pomiędzy pożarami rzeczywistymi i powierzchniami uzyskanymi w wyniku symulacji. W statystyce udział wzięło 78 zdarzeń, dla których stwierdzono brak pożaru w symulacjach. Ta rozbieżność jest w dużej części spowodowana zarówno rygorystycznemu potraktowaniu paliwa liściastego w modelu, jak i nie uwzględnieniem czynnika ludzkiego i dużego udziału pożarów celowych w przeszłości, wspomaganych materiałami łatwopalnymi. W analizie traktuje się je jako niezgodność modelu z rzeczywistością, nawet gdy rzeczywisty pożar był rzędu setnych bądź mniejszych części hektara. Największa zgodność panuje dla pożarów małych – zgodność dla 331 z 468 zdarzeń (70,7%) Gorzej wyszło porównanie dla pożarów średnich gdzie tylko 16 z 48 zdarzeń odnotowało zgodność (33,3%). Grupę pożarów dużych stanowiły 2 zdarzenia, z których w jednym stwierdzono zgodność przedziału, a w drugim jej brak. Oba te pożary były przez model niedoszacowane.

Przy nieuwzględnieniu w weryfikacji modelu zdarzeń nie dających pożarów w symulacjach, zgodność pomiędzy pożarami rzeczywistymi i powierzchniami uzyskanymi w wyniku symulacji wynosi 79,09% i analogicznie dla pożarów małych 83,38% oraz 39,05% dla pożarów średnich. Szczegóły zawiera załącznik nr 1.

Program niedoszacowuje średnie i duże pożary głównie ze względu na zastosowanie przeszkód liniowych w postaci dróg, ograniczających rozprzestrzenianie się pożaru. Niewykluczone, że część z nich może posiadać roślinność trawiastą w okresie wegetacyjnym i umożliwiać przenoszenie ognia.

Symulacje przeprowadzono dla okresu 72 godzin. By zredukować błąd wynikający z modelu i przyjętych założeń powierzchnie i inne parametry uzyskane w symulacjach dla scenariuszy klimatycznych będą porównywane z powierzchniami uzyskanymi również w symulacjach dla okresu historycznego dla czasu 2 godzin i 72 godzin dla wylosowanej pogody w dziesięcioleciu 2001-2010. W ten sposób nie będzie różnicy pomiędzy nimi wynikającej z nieznanego czasu detekcji, braku supresji, nieuwzględnieniu otoczenia czy zbyt rygorystycznych warunków omijania przeszkód liniowych.

W tabeli 3.2 zestawiono udział procentowy poszczególnych grup wielkości pożarów dla symulacji zdarzeń historycznych po czasie 2 i 72 godzin.

Tabela 5.2 Udział procentowy poszczególnych grup pożarów w symulacji zdarzeń historycznych 1989-2013

Rodzaj pożaru	Po czasie 2h		Po czasie 72 h	
	liczba	%	liczba	%
<b>mały</b>	498	74,11%	182	27,08%
<b>średni</b>	155	23,07%	187	27,83%
<b>duży</b>	19	2,83%	298	44,35%
<b>bardzo duży</b>	0	0,00%	5	0,74%
<b>łącznie</b>	672	100,00%	672	100,00%

Po czasie 2 godzin dominują pożary małe, ale po 3 dniach ich udział spada do 27,08%.

Widać tu ogromną rolę supresji, bez której 45,09 % pożarów ma potencjał do osiągnięcia rozmiarów dużych lub bardzo dużych. Według symulacji w okresie historycznym zapłon nastąpił w 575 zdarzeniach, co daje liczbę 269 pożarów na 10 lat.

Program szacuje intensywność pożaru FI (Fire Intensity) oraz prędkość rozprzestrzeniania się pożaru ROS (Rate of spread). Ponieważ wartości te są różne w różnych punktach obwodu pożaru, Prometheus podaje je przedziałami.

Przedziały intensywności pożaru FI przyjęte w programie:

- 1)  $<10 \text{ kW/m}$
- 2)  $10\text{-}500 \text{ kW/m}$
- 3)  $500\text{-}2000 \text{ kW/m}$
- 4)  $2000\text{-}4000 \text{ kW/m}$
- 5)  $4000\text{-}10000 \text{ kW/m}$
- 6)  $>10000 \text{ kW/m}$

Przedziały prędkości rozprzestrzeniania się ROS:

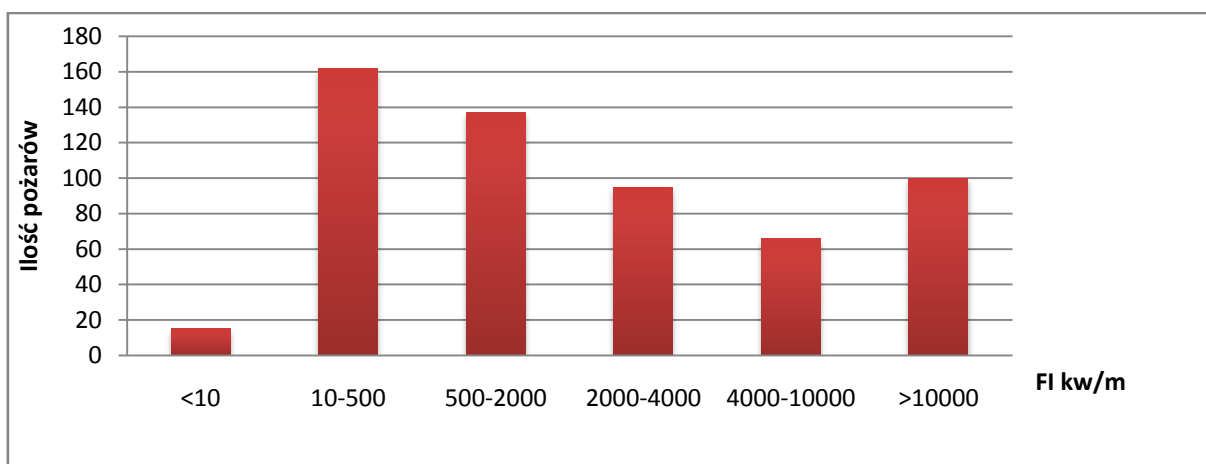
- 1)  $1 \text{ m/min}$
- 2)  $2\text{-}4 \text{ m/min}$
- 3)  $5\text{-}8 \text{ m/min}$
- 4)  $9\text{-}14 \text{ m/min}$
- 5)  $>15 \text{ m/min}$

Dla każdego kroku czasowego program podaje, jaki procent obwodu osiąga dany przedział intensywności pożaru lub prędkości rozprzestrzeniania się. Poniższa analiza bierze pod uwagę maksymalne przedziały osiągnięte w dowolnym momencie, w dowolnym miejscu obwodu pożaru w trakcie 3 dobowych symulacji.

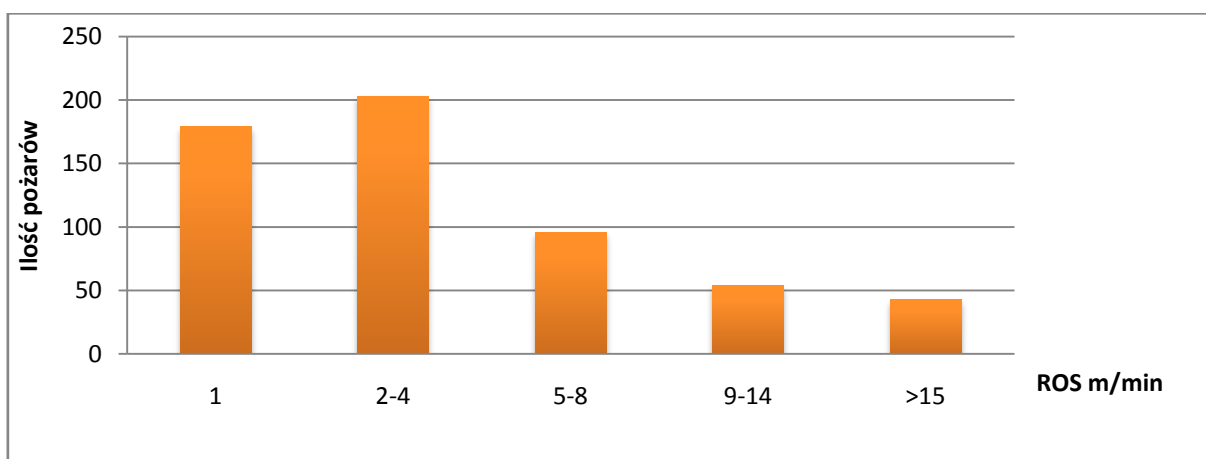
Dla okresu historycznego najczęstsze maksymalne wartości intensywności pożarów symulowanych przez 72 godziny zawierały się w przedziale  $10\text{-}500 \text{ kW/m}$  oraz  $500\text{-}2000 \text{ kW/m}$  (odpowiednio 28,1% i 23,8% pożarów). Najczęstsze maksymalne prędkości wynosiły  $1 \text{ m/min}$  (dla 31,1% pożarów) lub od 2 do 4  $\text{m/min}$  (35,3%). Szczegółowo obrazują to poniższe wykresy. Należy pamiętać, że są to wartości maksymalne występujące w czasie 72 godzinnej symulacji. Oznacza to, że mogą występować w dużej części pożaru przez czas kilku godzin, mogą też wystąpić na niewielkim odcinku frontu pożaru w tylko jednym kroku czasowym (20 min).



Uzyskane szacunki intensywności i prędkości pożarów zostały wygenerowane przez model w oparciu o kanadyjskie typy paliwa leśnego. W niniejszej pracy dołożono szczególnej uwagi, by dobrać jak najbardziej podobne pod względem palności typy paliw. Jednakże należy traktować te wyniki orientacyjnie. Wielkości takie jak intensywność i szybkość rozprzestrzeniania się są trudne do zmierzenia po pożarze. W systemie kanadyjskim parametry paliw wyznaczono za pomocą pożarów eksperymentalnych dla różnych warunków meteorologicznych. Pożary eksperymentalne, szczególnie te prowadzone dla ekstremalnych warunków trudno kontrolować. Poza tym powodują straty ekologiczne i są społecznie nieakceptowane. Z tych powodów większość badań opartych na pożarach eksperymentalnych, zwłaszcza w Europie to pożary o małym natężeniu (*M. Hanewinkel i in. 2010*).



Rysunek 5.2. Rozkład liczby pożarów według maksymalnego przedziału intensywności pożaru IF



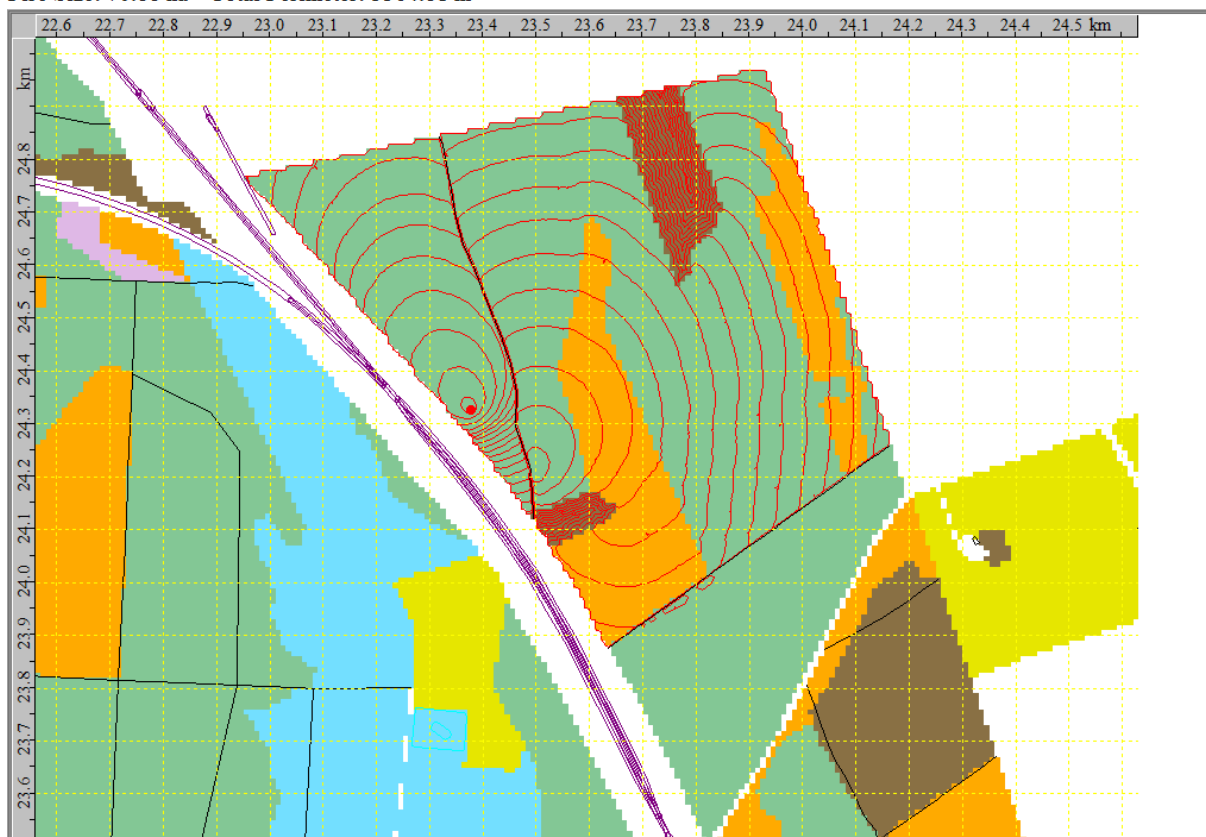
Rysunek 5.3. Rozkład liczby pożarów według maksymalnego przedziału prędkości rozprzestrzeniania się ROS

## Przypadek pożaru pod Regnami

Pożar pod Regnami z 29 sierpnia 1992 r. zasługuje na bliższe przyjrzenie się. Był to największy pożar w obszarze badawczym w rozważanym okresie. W zdarzeniu trwającym ponad 3 dni spłonęło 100 ha. Według raportu Straży Pożarnej pożar wybuchł w pobliżu stacji Mikołajów. Źródłem zapłonu była iskra z hamującego pociągu. Potencjał pożaru został niedoceniony w początkowej fazie akcji gaśniczej, w wyniku czego pożar pokonał liniowe przerwy paliwowe i osiągnął tak duży rozmiar.

Symulacja pożaru wykazała osiągnięcie po 12 godzinach powierzchni spalonej 70,88 ha. Po tym czasie pożar przestaje się rozwijać na skutek ograniczających go barier – przerw paliwowych w postaci drogi o szerokości 4m.

Prometheus Version: 6.2.1.19  
FGM Name: GORNIAGreen1992VanWagner109 Scenario Name: 109  
Date of Report: 2017-12-06 02:28:36  
Duration: August 29 10:30 - September 2 10:30 Display Interval: 00:20  
Fire Size: 70.88 ha Total Perimeter: 5364.81 m



Mapa 5.2. Wyniki 96 godzinnej symulacji pożaru nr 109 (pożar pod Regnami) z wykorzystaniem wyłącznie paliwa znajdującego się na obszarze Leśnego Kompleksu Promocyjnego Lasy Spalsko Rogowskie.

Sprawdzono jak wyglądała by symulacja, gdyby uwzględnić w niej obszar zadrzewień znajdujący się pomiędzy torami i obszarem badawczym, należący do Polskich Kolei Państwowych. Nie ma inwentaryzacji tego drzewostanu, więc przypisano mu mieszany skład gatunkowy z 50% udziałem drzew iglastych. Warstwa lasu PKP pochodzi z Bazy Danych Topograficznych BDOT10k Urzędu Marszałkowskiego Województwa Łódzkiego.



Mapy 5.3. Zadrzewienia PKP widoczne na zdjęciu lotniczym i w postaci warstwy topograficznej

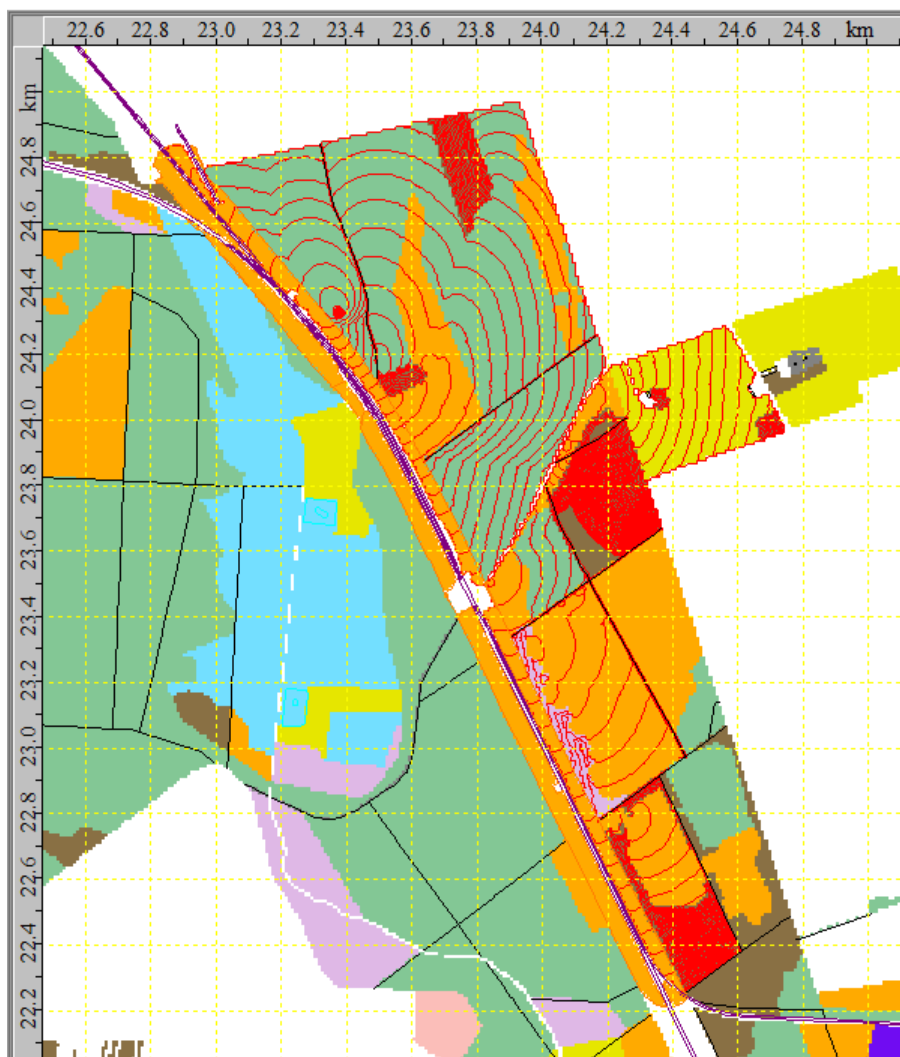
Prometheus Version: 6.2.1.19

FGM Name: GORNIAGreen1992VanWagner109 Scenario Name: 109

Date of Report: 2017-12-06 02:02:04

Duration: August 29 10:30 - September 2 10:30 Display Interval: 00:20

Fire Size: 164.45 ha Total Perimeter: 15990.42 m



Mapa 5.4. Wyniki 96 godzinnej symulacji pożaru nr 109 (pożar pod Regnami) z dodatkowym wykorzystaniem warstwy zadrzewień PKP.

W symulacji, do której dodano paliwo znajdujące się w obszarze sąsiadującym należącym do PKP powierzchnia spalona wzrosła w czasie 37 godzin i 20 min do 164,45 ha, po czym ustabilizowała się. Jest to obszar większy od historycznie odnotowanego, ale tu również nie uwzględniono akcji gaśniczej. Roślinność dodana do symulacji spełniła funkcję pomostu umożliwiającego ominięcie luk paliwowych.

Przykład ten pokazuje, że otoczenie obszaru ma ogromny wpływ na rzeczywisty rozmiar pożaru, o czym należy pamiętać analizując wyniki niniejszej pracy.

## 6. Kalibracja źródła zapłonu

Źródło zapłonu, miejsce i częstotliwość jego występowania są jednym z kluczowych elementów reżimu pożarowego. O ile nie można przewidzieć dokładnej daty i miejsca zaistnienia poszczególnego źródła zapłonu, możemy mówić o większym lub mniejszym prawdopodobieństwie związanym z bliskością osiedli ludzkich, porą dnia związaną z ludzką aktywnością w lesie, czy porą roku sprzyjającą powstawaniu zapłonów naturalnych.

W przyszłości może zajść szereg zmian wpływających na występowanie źródła zapłonu. Większa częstotliwość burz z wyładowaniami atmosferycznymi, związana ze zmianami klimatycznymi może zwiększyć frekwencję zapłonu ze źródeł naturalnych. Może zmienić się powszechny napęd w samochodach, zmniejszając ilość iskiei z tego źródła. Palenie papierosów może stać się niemodne albo nawet nielegalne. Mogą powstać nowe osiedla ludzkie w pobliżu lasu. Niniejsza praca skupia się na wpływie zmian klimatycznych na reżim pożarowy, dlatego przyjęte zostało założenie stałości schematu występowania źródła zapłonu. Nie będą również szacowane zmiany częstotliwości naturalnych źródeł zapłonu, z tego względu iż w obszarze badawczym dominują źródła antropogeniczne. Świadczy o tym rozłożenie pożarów w przestrzeni skupiające się w pobliżu torów kolejowych i osad ludzkich wzdłuż nich rozłożonych.

Do symulacji pożarów w przyszłości i porównywanej z nimi 10-letniej próby reżimu pożarowego w okresie historycznym, zostanie użyty ten sam schemat źródła zapłonu, który obserwowano w pożarach z przeszłości zarówno pod względem rozkładu przestrzennego jak i czasowego. Lokalizacja źródeł zapłonu zostanie taka sama jak w okresie historycznym. Ponieważ zapłony są związane z aktywnością ludzką również wzorzec aktywności w ciągu doby i w ciągu roku zostanie zachowany. Wybrane według poniższej metody pożary będą symulowane dla godziny, dni i miesięcy, w jakich wystąpiły w rzeczywistości.

Należy jednak ustalić częstotliwość zapłonu. Wiadomo, że nie każdy zapłon powoduje pożar. Musi natrafić na sprzyjające warunki, w tym głównie na odpowiednio suche paliwo. Różne rodzaje paliwa będą miały inną podatność na zapłon w zależności od ich indywidualnych zdolności do zatrzymywania wilgoci i podatności na wysychanie.

Warto przyrzeć się jak w okresie historycznym wyglądała lokalizacja źródeł zapłonu pod względem paliwa, z jakim się stykało. Procentowy udział typów paliwa, w których

występowała początkowa faza pożarów odpowiada w dużym stopniu procentowemu rozkładowi powierzchni poszczególnych typów paliw. Paliwo iglaste typu C-3 pokrywa 53,9% powierzchni obszaru badawczego. Dodatkowo jest to paliwo łatwo palne i chętnie sadzone w wydzieleniach wzdłuż torów, dlatego tam swój początek miało 54,5% pożarów. Drugie pod względem liczby występujących pożarów jest paliwo liściaste D-1/2 porastające 21,1% obszaru badawczego, któremu odpowiada 20,2% pożarów. Trzecie pod względem zajmowanej powierzchni jest paliwo z drzewostanem mieszanym M-1/2 obejmujące zasięgiem 15,4 % powierzchni badawczej, na terenie którego swój początek miało 17,2% pożarów.

Tabela 6.1. Występowanie początków pożarów w okresie historycznym 1989-2013 według typów paliwa.

Rodzaj paliwa	Liczba początków pożarów	Procent wszystkich pożarów [%]
C-2	0	0
C-3	367	54,5
C-4	10	1,5
C-5	3	0,5
C-7	10	1,5
D-1/2	136	20,2
M-1/2	116	17,2
O-1a/b	20	3
S-1	11	1,6
S-2	0	0
S-3	0	0

Ten udział procentowy typów paliwa, w których występuje zapłon zostanie zachowany w symulacjach wykonanych dla 10 letniego okresu w przyszłości obejmującego lata 2091-2100 i porównywanym z nimi okresem 2001-2010.

W celu ustalenia prawdopodobieństwa powstania pożaru dla każdego typu paliwa wybrano 1 pożar, który miał na jego terenie swój początek. Paliwa typu C-2, S-2 i S-3 wykluczono z analizy, gdyż nie były początkiem pożarów w okresie historycznym. Ponadto stanowią one znikomą część obszaru badawczego. Poniższa tabela zestawia pożary wybrane do analizy. Id - identyfikator pożarów jest liczbą porządkową pożaru historycznego nadaną chronologicznie zgodnie z załącznikiem nr 1.

Tabela 6.2. Pożary wybrane do kalibracji częstotliwości źródła zapłonu; Id- indywidualny identyfikator pożaru

Typ paliwa	C-3	C-4	C-5	C-7	D-1/2	M-1/2	O-1a/b	S-1
Id	141	15	225	326	641	194	186	561

Wybór konkretnego punktu ma małe znaczenie, gdyż w kalibracji zapłonu użyte zostaną dane z tylko jednej stacji meteorologicznej – Sulejów. Pozostają drobne różnice wynikające z topografii, ale z grubsza w danym typie paliwa o prawdopodobieństwie zapłonu decydować będą parametry pogodowe. Dla paliwa mieszanego M-1/2 wybrano pożar, który miał swój początek w wegetacji o składzie 50% drzew liściastych i 50% drzew iglastych.

Dla każdego z pożarów przeprowadzono po 100 prób w wylosowanych terminach z okresu historycznego i odpowiadających im warunkach meteorologicznych. Każdy rok z 25 letniego okresu historycznego reprezentowany był 4 razy. By uwzględnić rozkład dobowy i roczny pożarów miesiące i godziny losowane były ze zbioru wartości zaobserwowanych w pożarach historycznych. Dni miesiąca losowano ze zbioru <1,31>. W losowaniu wykorzystano metodę co n-tego elementu, gdzie n jest stosunkiem liczby danych w zbiorze do liczby 100. Dane podczas losowania uporządkowane były według numeru Id pożaru.

Próby polegały na przeprowadzeniu symulacji pożaru do momentu zauważenia propagacji ognia lub do 24 godzin. Punkt zapłonu w programie reprezentowany jest w postaci poligonu w kształcie szesnasto-kąta foremnego wpisanego w okrąg o średnicy 0,5m (*C. Tymstra i in. 2010*). Jego obwód wynosi 1,56m. Jeśli w trakcie symulacji obwód części zapalanej był większy niż początkowe 1,56 m uznano, że pożar miał miejsce.

Prawdopodobieństwo zapłonu w danym typie paliwa na podstawie 100 prób wygląda następująco:

Tabela 6.3 Prawdopodobieństwo wystąpienia pożaru w danym typie paliwa według 100 prób, maksymalnie 24 godzinnych symulacji w programie Prometheus.

Typ paliwa	C-3	C-4	C-5	C-7	D-1/2	M-1/2	O-1a/b	S-1
<b>Prawdopodobieństwo powstania pożaru</b>	88/100	95/100	83/100	93/100	21/100	95/100	98/100	96/100

Wyniki prób dla poszczególnych symulacji zawiera załącznik nr 2.

Najłatwiej zapłonowi ulegają trawy – typ O-1a/b oraz pod względem budowy bardzo do niej zbliżone tereny po wycince S-1. W paliwie iglastym typu C widać zróżnicowanie pod względem wieku drzewostanu, składu gatunkowego i zwarcia. Im starszy drzewostan, im jest mniej zwarty i dół korony jest wyżej, tym mniejsza podatność na zapłon.

Najslabiej zapłonowi ulegały drzewostany liściaste- typ paliwa D-1/2, które pomimo uwzględnienia w symulacjach łatwiej palnej fazy bezlistnej od listopada do marca włącznie,

oparły się ogniovi w blisko 80% przypadków. Jest to spowodowane wyjątkowo rygorystycznemu potraktowaniu możliwości powstania i propagacji ognia w drzewostanach liściastych. Ma to swoje uzasadnienie, gdyż generalnie lasy liściaste palą się mniej chętnie. Jednakże jak pokazała weryfikacja modelu dla okresu historycznego, są to kryteria zbyt restrykcyjne. Na 138 pożarów z okresu historycznego mających początek w drzewostanach liściastych D-1/2 zapłonowi w modelu uległo zaledwie 57 z nich, co stanowi 41,3%. Typ paliwa D-2 – ulistniony drzewostan liściasty został stworzony jako niestandardowy typ, w którym powstanie i rozwój ognia są możliwe w ściśle określonych warunkach – wskaźnik BUI Buildup Indeks, łączący w sobie kod wilgotności i kod suszy musi osiągnąć granicę, 80 by rozwój pożaru w ogóle był możliwy (*Prometheus- User Manual, 2009*). Zastosowanie w symulacjach przyszłego reżimu pożarowego prawdopodobieństwa zapłonu według powyższej próby 21/100 mogło by spowodować dużą nadreprezentację zapłonów w typie paliwa D-1/2. W paliwie liściastym, stanowiącym zaledwie 21,1 % wystąpiło by 52.1% źródeł zapłonu, co nie jest zgodne z prawdą. Kolejnym argumentem za odrzuceniem wyniku uzyskanego dla D-1/2 jest wysokie prawdopodobieństwo zapłonu dla paliwa mieszanego M-1 stanowiącego połączenie paliwa liściastego i iglastego. Paliwo mieszane, które w 50% stanowią drzewa liściaste ma wyższe prawdopodobieństwo zapłonu niż część paliw iglastych. W dalszej części wyznaczania ilości źródeł zapłonu dla paliwa liściastego D-1 użyta będzie proporcja 57/138 według symulacji pożarów historycznych przeprowadzonej podczas weryfikacji modelu. Dzięki temu symulacje zdarzeń w przyszłości będą uwzględniać zarówno mniejsza palność drzew liściastych jak i błąd modelu wykazany w jego weryfikacji dla tego typu paliwa. Należy jednak pamiętać, że przyjęta liczba źródeł zapłonu dla paliwa D-1/2 stanowić będzie dodatkowe źródło niepewności i należy to wziąć pod uwagę w analizie ilości przyszłych pożarów.

W 25-leciu okresu historycznego miało miejsce 673 pożarów, co daje średnio 26,9 pożarów na rok. Liczbę źródeł zapłonu przypadającą na 10 lecie symulacji scenariuszy klimatycznych z uwzględnieniem prawdopodobieństwa powstania pożaru należy obliczyć dla każdego paliwa oddzielnie. Przedstawia to tabela 6.4. Zastosowany tu współczynnik korygujący jest odwrotnością prawdopodobieństwa zapłonu w danym typie paliwa.



Tabela 6.4 Liczba źródeł zapłonów odpowiadająca okresowi 10 lat

Typ paliwa	Liczba pożarów w 25-leciu	Liczba pożarów w 10-leciu	Współczynnik korygujący	Liczba źródeł zapłonu w 10-leciu	Liczba źródeł zapłonu w 10-leciu po zaokrągleniu
<b>C-3</b>	367	146,8	1,14	166,82	<b>167</b>
<b>C-4</b>	10	4,0	1,05	4,21	<b>4</b>
<b>C-5</b>	3	1,2	1,20	1,45	<b>1</b>
<b>C-7</b>	10	4,0	1,08	4,30	<b>4</b>
<b>D-1/2</b>	136	54,4	2,42*	131,71	<b>132</b>
<b>M-1/2</b>	116	46,4	1,05	48,84	<b>49</b>
<b>O-1a/b</b>	20	8,0	1,02	8,16	<b>8</b>
<b>S-1</b>	11	4,4	1,04	4,58	<b>5</b>
<b>Łącznie</b>	<b>673</b>	<b>269,2</b>			<b>370</b>

\*-prawdopodobieństwo wyznaczone z symulacji pożarów okresu historycznego

W symulacjach pożarów dla scenariuszy klimatycznych i dziesięcioletniego okresu porównawczego (2001-2010 r.) biorą udział zdarzenia z okresu historycznego. Wylosowano zestaw 370 źródeł zapłonu. Liczba źródeł zapłonu w poszczególnych typach paliwa odpowiada wartości przedstawionym w tabeli 6.4. Użyto metody losowania systematycznego, w której dla danego typu paliwa wybierany jest co n-ty element, gdzie n jest stosunkiem liczby źródeł w danym paliwie w całym okresie historycznym do wymaganej liczby źródeł. Każdemu losowanemu zdarzeniu odpowiada miesiąc i godzina w jakich miał miejsce. Zdarzenia podczas losowania ułożone są chronologicznie według załącznika nr 1.

Poniżej przykład procedury losowania dla paliwa C-4, gdzie z 10 zdarzeń wybrano 4.

$$n = 10:4 = 2,5$$

Tabela 6.5 Wybór źródeł zapłonu dla paliwa C-4

Pożary do wybrania	* n	Numer wybranego pożaru po zaokrągleniu
<b>1</b>	2,5	<b>3</b>
<b>2</b>	5,0	<b>5</b>
<b>3</b>	7,5	<b>8</b>
<b>4</b>	10,0	<b>10</b>

Metoda losowania systematycznego zaczerpnięta została z opracowania: „Statystyka z elementami matematyki dla geografów”, B. Jokiel i B. Kostrubiec; 1981.

W symulacjach pożarów dla scenariuszy klimatycznych w okresie 2091-2100 i okresu porównawczego 2001-2010 weźmie udział 370 źródeł zapłonu odpowiadających lokalizacji i porze dnia i roku pożarów historycznych. We wszystkich trzech seriach symulacji będą to dokładnie te same źródła zapłonu wraz z godziną, dniem i miesiącem jakie miały w okresie historycznym. Żadne ze źródeł zapłonu nie będzie się powtarzać w jednym scenariuszu. Zapłon zostanie rozłożony równomiernie na 10 lat, po 37 w każdym roku.

## **7. Porównanie reżimów pożarowych dla pierwszego i ostatniego dziesięciolecia XXI wieku**

Do badania przyszłego reżimu pożarowego wybrano 2 scenariusze klimatyczne reprezentatywnych ścieżek stężenia RCP rekomendowanych przez Międzynarodowy Zespół ds. Zmian Klimatu IPCC.

W ramach scenariuszy klimatycznych (Representative Concentration Pathways) RCP przeanalizowano warianty RCP 4.5 oraz RCP 8.5 odpowiadające wymuszeniu radiacyjnemu spowodowanemu większą koncentracją gazów cieplarnianych odpowiednio o 4,5 i 8.5 W/m<sup>2</sup>. Dane pochodzą z modelu stworzonego przez grupę CLMcom, koordynowaną przez CORDEX. W jej skład wchodzi:

BTU - Brandenburg University of Technology

DWD - Deutscher Wetterdienst

ETHZ - Eidgenoessische Technische Hochschule Zurich

UCD - Meteorology and Climate Centre, University College Dublin

WEGC - wegner Centre of Climate and Global Change, University of Graz, Austria

Do badań wykorzystano 10 letnią serię dobowych danych meteorologicznych prognozowanych dla lat 2091-2100. Porównanie podstawowych parametrów meteorologicznych scenariuszy i historycznego okresu próbnego zawiera tabela nr 7.1

Tabela 7.1 Średnie wartości dobowych parametrów meteorologicznych oraz średniego rocznego opadu według danych historycznych oraz scenariuszy klimatycznych dla Sulejowa

Dane meteorologiczne	T śr [°C]	T max [°C]	Rh śr [%]	V śr [km/h]	V max [km/h]	Opad [mm]	Opad lip/opad sty.
<b>Dane historyczne 1989-2013</b>	8,39	12,51	79,68	12,55	21,2	577,03	2,87
<b>Dane historyczne 2001-2010</b>	8,49	12,74	79,3	12,52	21,45	597,34	2,4
<b>RCP 4.5 2091-2100</b>	8,91	12,22	79,4	12,82	20,99	650,52	1,13
<b>RCP 8.5 2091-2100</b>	11,26	14,65	77,57	12,59	20,62	678,39	0,92

T śr- średnia dobową temperaturą, T max – średnia maksymalna dobową temperaturą, Rh śr – średnia dobową wilgotność względną, Rh max – średnia maksymalna dobową wilgotność względną, V śr – średnia dobową prędkość wiatru, V max – średnia maksymalna dobową prędkość wiatru, Opad – średni roczny opad, Opad lip/opad sty. – stosunek ilości opadów w lipcu do ilości opadów w styczniu liczony dla całego okresu

Scenariusz RCP 4.5 dla Sulejowa charakteryzuje się wzrostem średniej temperatury dobowej o ponad pół stopnia Celsjusza w porównaniu z okresem 1989-2013. Zmniejszeniu natomiast ulega średnia dobowych temperatur maksymalnych. Rosną opady i ich rozkład w ciągu roku staje się bardziej równomierny. Minimalnie spada średnia wilgotność względna, ale uwzględniając wyższą temperaturę zawartość pary wodnej w powietrzu oraz punkt rosy są wyższe.

Scenariusz RCP 8.5 zakłada wzrost temperatury średniej o blisko 3 °C. Średnia temperatura maksymalna rośnie o ponad 2 stopnie. Jest to również scenariusz o największym wzroście ilości opadów rocznych. Zmienia się ich rozkład w ciągu roku, ale w dalszym ciągu jest dość równomierny. Pomimo mniejszej o ponad 2% wilgotności względnej ma on najwyższą wśród scenariuszy i danych historycznych zawartość wilgoci w powietrzu.

Dla scenariuszy klimatycznych zostało przeprowadzonych po 370 symulacji wybranych pożarów z okresu historycznego, odpowiadających częstotliwości występowania źródeł zapłonu w okresie 10 letnim. Symulacje przeprowadzono dla obu scenariuszy dla lat 2091-2100. Do symulacji wykorzystano dobowe dane meteorologiczne wygenerowane przez modele klimatyczne. Są one przypisane wirtualnej stacji meteorologicznej, położonej w okolicach Sulejowa, według współrzędnych 19,94502 długości wschodniej i 51,33903

szerokości północnej. W scenariuszach nie ma prędkości minimalnej wiatru wymaganej przez program Prometheus. Te dane zastąpiono połową dobowej prędkości średniej.

Dane uzyskane z symulacji pożarów dla lat 2091-2100 dla dwóch scenariuszy klimatycznych zostaną porównane z danymi uzyskanymi również w symulacjach dla pierwszego dziesięciolecia XXI wieku z wykorzystaniem rzeczywistych danych meteorologicznych z lat 2001-2010. Warunki symulacji pożarów z początku wieku są identyczne jak dla scenariuszy klimatycznych. Dla okresu 2001-2010 zostanie przeprowadzonych 370 symulacji z dokładnie tymi samymi punktami zapłonu i ich rozłożeniem w czasie jak dla RCP 4.5 i RCP 8.5. Metodologia ich wyznaczenia została szczegółowo opisana w rozdziale kalibracja źródła zapłonu. Pogoda występująca w symulacjach we wszystkich 3 przypadkach ma charakter losowy, dzięki czemu okres historyczny nie jest uprzywilejowany wyborem dni, w których pogoda bardziej sprzyjała pożarom. Dla symulacji dziesięciolecia historycznego zostały przeprowadzone z wykorzystaniem danych ze stacji Sulejów.

Dane meteorologiczne do symulacji dla scenariuszy klimatycznych mają rozdzielczość czasową 1 dobę. Program Prometheus interpoluje dane do serii godzinowych za wyjątkiem kierunku wiatru. Kierunek wiatru przyporządkowany do maksymalnej prędkości dobowej pozostaje niezmienny w ciągu 24 godzin, co ma wpływ na kształt i rozmiar pożaru. Zmienny wiatr w trakcie pożaru rozciąga jego powierzchnię w różnych kierunkach. W przypadku wiatru jednokierunkowego dodatkowe rozciąganie powierzchni ma miejsce tylko w jedną stronę. By przekonać się w jaki sposób stały dobowy kierunek wiatru wpłynie na powierzchnię pożarów dla scenariuszy klimatycznych, przeprowadzono próbę dla siedmiu pożarów historycznych z 1994 r., którym zmieniono kierunek wiatru na stały w ciągu doby, według kierunku prędkości maksymalnej danego dnia (najczęstszego lub najbardziej wyśrodkowanego jeśli prędkość maksymalna się powtarza). Podobnie jak w przypadku scenariuszy klimatycznych przeprowadzono dla nich symulacje z użyciem jednej stacji meteorologicznej- Sulejów.

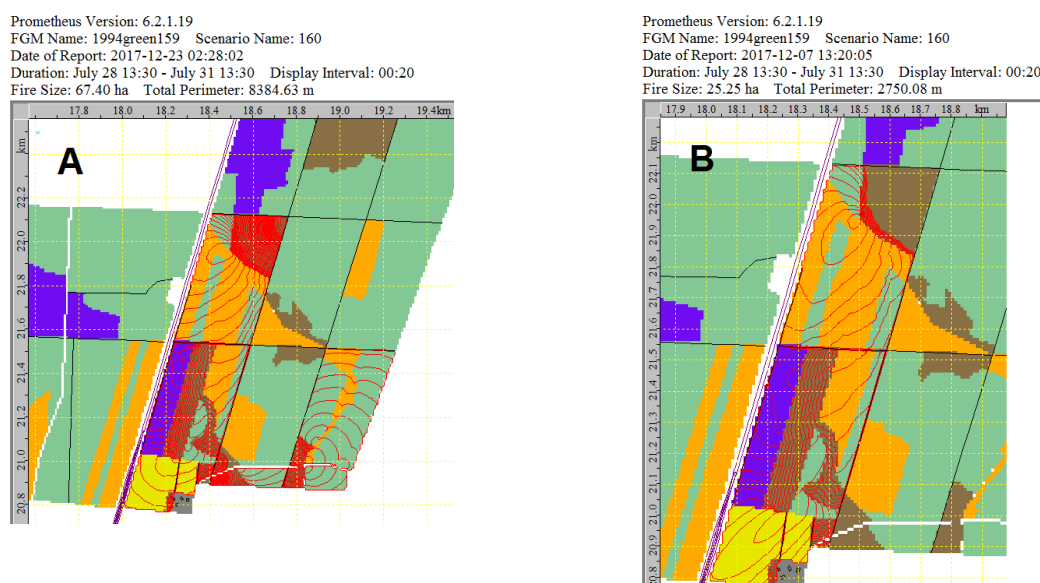
Na podstawie tych 7 przykładów stwierdzono, że zmiana kierunku wiatru na stały w ciągu 24 godzin nie ma jednokierunkowego wpływu na powierzchnię spaloną. Przy stałym kierunku wiatru powierzchnia spalona może być:

1. Mniejsza, gdy stały kierunek wiatru nie sprzyja rozwojowi pożaru w pozostałych kierunkach

2. Taka sama, gdy pomimo stałego kierunku wiatru pożar sukcesywnie rozwija się do zajęcia całej dostępnej powierzchni paliwa ogrodzonej przerwami paliwowymi
3. Jest większa, gdy stały kierunek wiatru działa w stronę zasobnych w łatwopalne paliwo terenów, lub przy dużej prędkości wiatru umożliwia pokonywanie kolejnych barier liniowych.

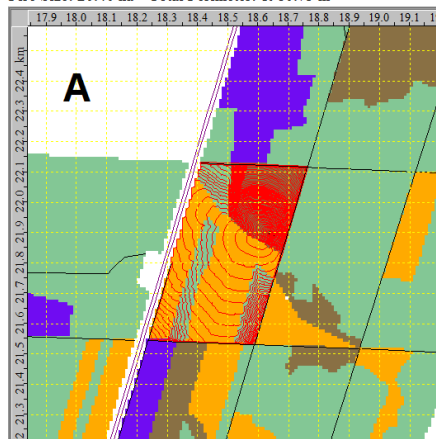
W terenie zróżnicowanym pod względem jakości paliwa, poprzedzianym przerwami paliwowymi wpływ stałości kierunku wiatru na powierzchnie spaloną będzie zależał od okoliczności w każdym indywidualnym pożarze. Należy przyjąć, że to uproszczenie jest jednym ze źródeł różnic pomiędzy symulowanymi pożarami dla 10-lecia historycznego i pożarami dla scenariuszy klimatycznych.

Poniżej konkretne przykłady różnic w pożarach symulowanych przy stałym i zmiennym kierunku wiatru.

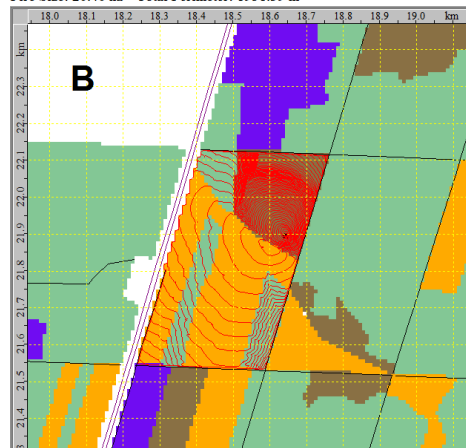


Zmniejszenie powierzchni spalonej względem symulacji ze stałym dobowym kierunkiem wiatru

Prometheus Version: 6.2.1.19  
 FGM Name: 1994green169 Scenario Name: 169  
 Date of Report: 2017-12-23 02:48:03  
 Duration: August 5 14:25 - August 8 14:25 Display Interval: 00:20  
 Fire Size: 20.40 ha Total Perimeter: 1980.75 m

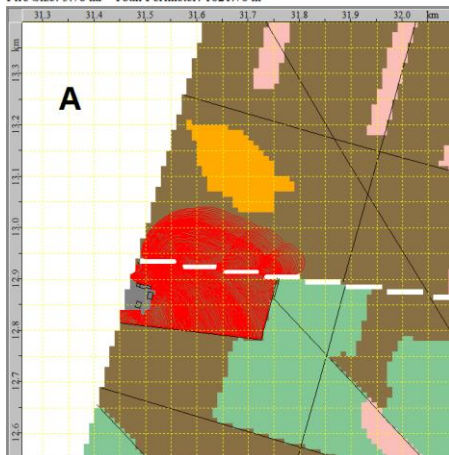


Prometheus Version: 6.2.1.19  
 FGM Name: 1994green169 Scenario Name: 169  
 Date of Report: 2017-12-07 17:36:38  
 Duration: August 5 14:25 - August 8 14:25 Display Interval: 00:20  
 Fire Size: 20.40 ha Total Perimeter: 1951.39 m

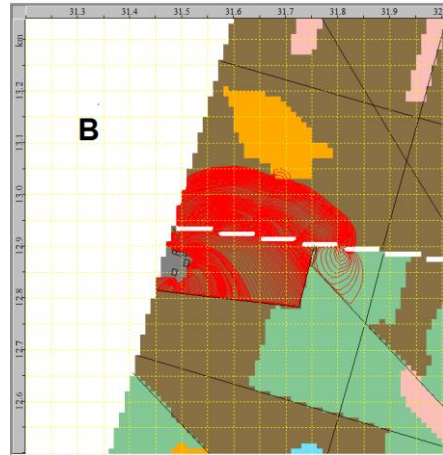


Taka sama powierzchnia spalona

Prometheus Version: 6.2.1.19  
 FGM Name: 1994green149 Scenario Name: 150  
 Date of Report: 2017-12-23 02:01:18  
 Duration: July 4 12:17 - July 7 12:17 Display Interval: 00:20  
 Fire Size: 5.78 ha Total Perimeter: 1621.76 m



Prometheus Version: 6.2.1.19  
 FGM Name: 1994green149 Scenario Name: 150  
 Date of Report: 2017-12-07 11:55:51  
 Duration: July 4 12:17 - July 7 12:17 Display Interval: 00:20  
 Fire Size: 7.23 ha Total Perimeter: 2053.84 m



Zwiększenie powierzchni spalonej względem symulacji ze stałym dobowym kierunkiem wiatru

Mapa 7.1. Porównanie powierzchni spalonych w ciągu 3 dób w symulacjach dla: A – stałego kierunku wiatru w ciągu 24 godzin i B – zmiennego kierunku wiatru w ciągu 24 godzin

## 7.1. Wyniki symulacji

Przeprowadzono 3 identyczne pod względem ilości i rozkładu źródeł zapłonów serie symulacji pożarów dla pierwszego i ostatniego dziesięciolecia XXI wieku: z użyciem rzeczywistych danych meteorologicznych dla okresu 2001-2010 oraz dla wygenerowanych w modelu klimatycznym serii danych meteorologicznych dla scenariuszy RCP 4.5 i RCP 8.5 dla okresu 2091-2100.

Zestawienie liczby pożarów i średnich powierzchni spalonych po czasie 2 i 72 godzin dla trzech serii symulacji przedstawia tabela nr 7.2. Tabela 7.3. przedstawia rozkład pożarów

w poszczególnych grupach wielkości. Szczegółowe wyniki dla poszczególnych symulacji zawiera załącznik nr 3.

Tabela 7.2. Liczba pożarów i średnie powierzchnie spalone po czasie 2 i 72 godzin według symulacji przeprowadzonych dla okresu historycznego 2001-2010 oraz dziesięciolecia 2091-2100 według scenariuszy RCP 4.5 i RCP 8.5

Dziesięciolecie	Liczba pożarów w 10-leciu	Średnia powierzchnia spalona po czasie 2 godzin [ha]	Średnia powierzchnia spalona po czasie 72 godzin [ha]
Okres historyczny 2001-2010	247	0,61	11,64
Scenariusz RCP 4.5 2091-2100	245	0,96	10,42
Scenariusz RCP 8.5 2091-2100	262	1,02	12,92

Tabela 7.3. Rozkład wielkości pożarów w 10 próbnym okresie historycznym i dla dwóch scenariuszy klimatycznych RCP 4.5 i RCP 8.5

Okres historyczny 2001-2010				
Rodzaj pożaru	Po czasie 2h		Po czasie 72 h	
	liczba	procent	liczba	procent
Mały	216	87,45%	73	29,55%
średni	30	12,15%	80	32,39%
duży	1	0,40%	94	38,06%
bardzo duży	0	0,00%	0	0,00%
łącznie	247	100,00%	247	100,00%
Scenariusz RCP 4.5 2091-2100				
Rodzaj pożaru	Po czasie 2h		Po czasie 72 h	
	liczba	procent	liczba	procent
mały	203	82,86%	87	35,51%
średni	38	15,51%	85	34,69%
duży	4	1,63%	71	28,98%
bardzo duży	0	0,00%	2	0,82%
łącznie	245	100,00%	245	100,00%
Scenariusz RCP 8.5 2091-2100				
Rodzaj pożaru	Po czasie 2h		Po czasie 72 h	
	liczba	procent	liczba	procent
mały	213	81,30%	66	25,19%
średni	45	17,18%	90	34,35%
duży	4	1,53%	105	40,08%
bardzo duży	0	0,00%	1	0,38%
łącznie	262	100,00%	262	100,00%

## 7.2. Dyskusja

Porównując pierwsze i ostatnie dziesięciolecie XXI wieku pod względem liczby i rodzaju występujących pożarów widać zmiany. Nie zawsze są to zmiany w tym samym kierunku w obu scenariuszach.

Dla scenariusza RCP 4.5 liczba pożarów zmalała o 2 w porównaniu z pierwszym dziesięcioleciem XXI wieku. Wzrosła powierzchnia średnia pożaru po 2 godzinach – o 57,4%, zmalała powierzchnia średnia pożaru po 3 dobach o 10,5%. Tak duży spadek powierzchni spalonej po 3 dobach spowodowany jest największą wśród trzech serii symulacji liczbą pożarów małych. Scenariusz RCP 4.5 jest bardziej zbliżony pod względem meteorologicznym do porównywanego okresu 2001-2010. Wpływ wzrostu średniej temperatury o 0,42 °C jest częściowo niwelowany zwiększoną ilością opadów oraz niższymi wartościami ekstremalnymi temperatury. W porównaniu z pierwszym dziesięcioleciem XXI wieku rośnie liczba i udział procentowy pożarów średnich i dużych dla czasu 2 godziny od zapłonu. Maleje udział pożarów dużych dla czasu 72 godziny.

Scenariusz RCP 4.5 ma dwa pożary bardzo duże – najwięcej ze wszystkich trzech serii symulacji i o największych powierzchniach. Rozwojowi pożarów dużych muszą towarzyszyć odpowiednio wysoka temperatura i niska wilgotność. Pożary bardzo duże wymagają dodatkowo odpowiednio wysokiej prędkości wiatru by mogły pokonywać przeszkody liniowe na swojej drodze. W programie Prometheus jest to możliwe, gdy płomienie osiągną co najmniej 1,5 szerokości przeszkody. Scenariusz RCP 4.5 ma najwyższą średnią maksymalną dobową prędkość wiatru wśród wszystkich trzech serii symulacji, co częściowo tłumaczy większą liczbę pożarów bardzo dużych dla tej wersji przyszłości. Oba pożary bardzo duże mają miejsce przy temperaturze maksymalnej wynoszącej co najmniej 28 °C i prędkości wiatru powyżej 20 km/h.



Prometheus Version: 6.2.1.19  
 FGM Name: 254\_256 Scenario Name: 256  
 Date of Report: 2018-01-02 02:16:23  
 Duration: September 15 16:33 - September 18 16:33 Display Inte  
 Fire Size: 219.12 ha Total Perimeter: 31832.73 m



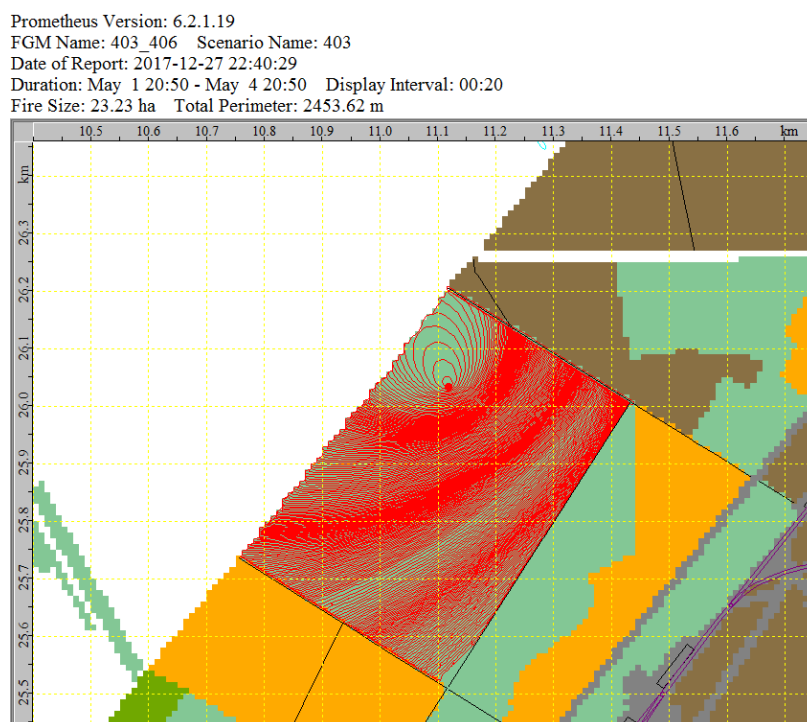
Mapa 7.2. Wyniki 72 godzinnej symulacji pożaru 256 dla scenariusza RCP 4.5 (powierzchnia po 3 dobach jest mniejsza od powierzchni maksymalnej, gdyż pożar zaczął się wycofywać)

Pożar 256 swój największy wzrost osiąga przy wilgotności względnej poniżej 30%. Przyrasta wówczas w ciągu pierwszych 3 godzin i 20 minut do rozmiarów 106,61 ha. Po 24 godzinach 40 minutach osiąga imponujące rozmiary 232,1 ha. Drugi z pożarów bardzo dużych – pożar 513 rozwija się równomiernie przy wilgotności względnej powyżej 40% i prędkościach wiatru dochodzących do 22,9 km/h. Rozmiar 170,11 ha osiąga po 29 godzinach i 20 minutach.

Dla scenariusza RCP 8.5 liczba pożarów w ostatnim dziesięcioleciu XXI wieku wzrasta o 6,1%. Rosną powierzchnie spalone zarówno dla czasu 2 godziny od zapłonu – o 67,2%, jak i dla czasu 3 doby od zapłonu – o 11%. Zwiększają się udziały pożarów średnich i dużych po 2 i 72 godzinach. W symulacjach scenariusza RCP występuje tylko jeden pożar bardzo duży, głównie za sprawą najniższej wśród trzech serii symulacji średniej maksymalnej dobowej prędkości wiatru. Z drugiej strony jest to scenariusz o największej średniej prędkości dobowej, co przyczynia się do zwiększenia liczby pożarów dużych. Pożar bardzo duży mający miejsce w tej serii symulacji osiąga rozmiar 111,24 ha po czasie 66 godzin.

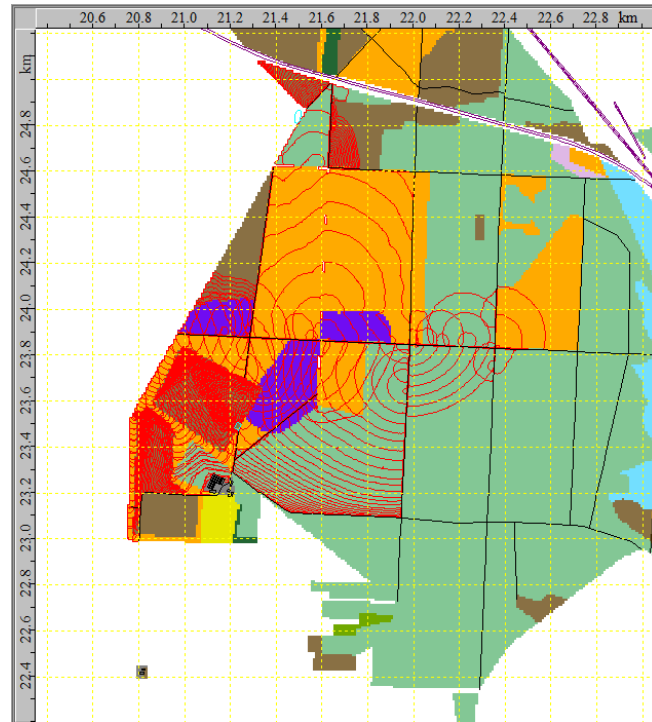
Największy wzrost osiągnął przy wilgotności względnej w okolicach 30% i prędkości wiatru dochodzącej do 24,5 km/h. Temperatura powietrza w tym pożarze nie przekraczała 24,1 °C. Reżim pożarowy według scenariusza RCP 8.5 zdecydowanie przybiera ostrzejszy charakter zarówno pod względem liczby pożarów, jak i spalonej w nich powierzchni.

Charakterystyczna dla obu scenariuszy jest mniejsza różnica względem serii porównawczej 2001-2010, w średniej powierzchni spalonej po 72 godzinach. Widać tu ogromny wpływ przeszkód liniowych, które stabilizują pożary średnie i duże, uniemożliwiając ich dalszy rozwój. Symulacje wykazały dużą skuteczność istniejącego systemu dróg przeciwpożarowych w przeciwdziałaniu pożarom przy niskiej i umiarkowanej prędkości wiatru.



Mapa 7.3. Pożar ograniczony przeszkodami liniowymi w postaci dróg. Wyniki 3 dniowej symulacji zapłonu 403 dla scenariusza RCP 8.5

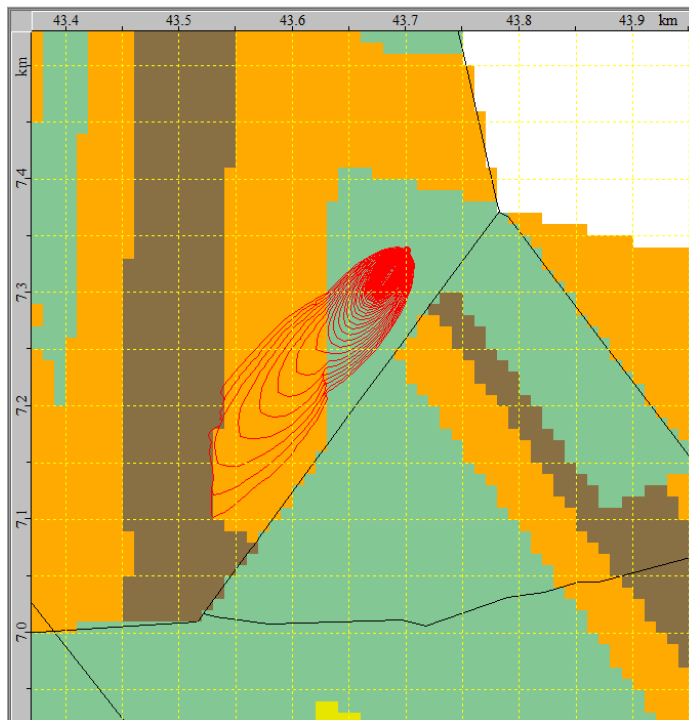
Prometheus Version: 6.2.1.19  
FGM Name: 248\_249 Scenario Name: 248  
Date of Report: 2017-12-18 15:59:50  
Duration: August 7 18:20 - August 10 18:20 Display Interval: 00:20  
Fire Size: 137.84 ha Total Perimeter: 12035.40 m



Mapa 7.4. Pożar przekraczający przeszkody liniowe. Wyniki 3 dniowej symulacji zapłonu 248 dla scenariusza RCP 4.5

Pożar stabilizowany jest również napotkaniem mniej palnego drzewostanu. Widać to głównie na przykładzie pożarów mających początek w lesie iglastym lub mieszanym, które docierają do bardziej odpornego drzewostanu liściastego- typ paliwa D1/2.

Prometheus Version: 6.2.1.19  
FGM Name: 13\_16 Scenario Name: 13  
Date of Report: 2017-12-27 01:56:17  
Duration: April 26 16:30 - April 29 16:30 Display Interval: 00:20  
Fire Size: 1.76 ha Total Perimeter: 649.12 m



Mapa 7.5. Pożar ograniczony drzewostanem liściastym. Wyniki 3 dniowej symulacji zapłonu 13 dla scenariusza RCP 8.5

Szanse powstania i rozwoju pożaru w drzewostanie liściastym D1 są bardzo małe w programie Prometheus, co zostało wcześniej przeanalizowane w weryfikacji modelu. Jest to widoczne również w 3 seriach symulacji; dla scenariuszy klimatycznych i okresu porównawczego 2001-2010. Przykładowo dla scenariusza RCP 8.5 na 108 zdarzeń, w których stwierdzono brak pożaru, aż 90,7% z nich miało miejsce w paliwie D1. Paliwo D-1 zapaliło się w tym scenariuszu tylko 34 razy na 132 próby.

Generalnie dla trzech serii 10-letnich symulacji scenariusz RCP 8.5 ma najostrejszy reżim pożarowy. W poszczególnych latach nie zawsze jest to regułą. W symulacjach dla pierwszego dziesięciolecia XXI w. wyróżnia się rok 2009, w którym miała miejsce długotrwała susza obejmująca miesiące wiosenne. Dla tego roku w symulacjach dla 72 godzin spaliło się 21% całkowitej powierzchni spalonej całej 10-letniej serii i ponad dwukrotnie więcej niż w odpowiadającym mu roku 2009 w scenariuszu RCP 8.5. Zjawiska ekstremalne jak długotrwałe susze silnie wpływają na reżim pożarowy. Scenariusze klimatyczne dla

Sulejowa zarówno RCP 4.5 jak i RCP 8.5 optymistycznie zakładają ich małą częstotliwość w przyszłości.

## **8. Wnioski**

Po przeanalizowaniu materiału zebranego w niniejszej pracy można dojść do następujących wniosków:

1. Reżim pożarowy pod koniec XXI wieku w Leśnym Kompleksie Promocyjnym „Lasy Spalsko Rogowskie” zależy w dużym stopniu od tego, w jaki sposób będzie ocieplał się klimat globalny
2. Dla scenariusza RCP 4.5 zmiana jest umiarkowana. Niewielki wzrost temperatury jest niwelowany częściowo zwiększonymi opadami i mniejszymi wartościami temperatur maksymalnych. Pożary w scenariuszu RCP 4.5 mają większą prędkość rozprzestrzeniania się w początkowej fazie pożaru. Duża liczba pożarów małych powoduje spadek średniej powierzchni spalonej po 3 dobach, względem początku XX wieku.
3. Dla scenariusza RCP 8.5 prognozowany jest wzrost zagrożenia pożarowego zarówno przez większą liczbę pożarów jak i większe ich rozmiary. Kierunek zmiany reżimu pożarowego jest dla tego scenariusza jednoznaczny i niekorzystny.
4. Wskazane są dalsze badania przyszłego reżimu pożarowego z użyciem innych modeli klimatycznych
5. Zjawiska ekstremalne jak długotrwałe susze intensywnie zwiększają ryzyko pożarowe.
6. Duży wpływ na powstawanie pożarów bardzo dużych ma występowanie zarówno wysokiej temperatury, niskiej wilgotności względnej oraz wysokich prędkości wiatru umożliwiających pokonywanie przeszkód liniowych.
7. Występująca w obszarze fragmentacja drogami pełni funkcję stabilizacji pożarów i zmniejszenia ich powierzchni. Z drugiej strony jest poważnym źródłem zapłonu. Dalsza fragmentacja obszaru nie jest wskazana. Przy

pożarach bardzo dużych sieć dróg i tak nie stanowi wystarczającej przeszkody w rozprzestrzenianiu się.

8. Model Prometheus nadaje się do badań zmian reżimu pożarowego pod wpływem klimatu. Podczas analizy jego wyników należy jednak mieć na uwadze jego ograniczenia, w tym niepewność związaną z przyporządkowaniem polskiej roślinności typów paliwa opracowanych w warunkach kanadyjskich.
9. W badaniach z wykorzystaniem modelu Prometheus należy pamiętać, że zawyża on średnio dwukrotnie powierzchnię spaloną, co głównie spowodowane jest nieuwzględnieniem akcji gaśniczych w symulacjach
10. Zaproponowany sposób klasyfikacji drzewostanów występujących w Polsce jako paliwo w programie Prometheus, dał dużą sprawdzalność zachowania się pożarów symulowanych względem rzeczywistych powierzchni spalonych. Warto jednak podejmować próby lepszego przystosowania parametrów palności typów paliwa do danych uzyskanych w polskich pożarach.
11. Paliwo D-1 odpowiadające drzewostanom liściastym ma w modelu Prometheus zbyt małą możliwość powstania i rozprzestrzeniania się pożaru. Wskazane jest dalsze zróżnicowanie typów paliw liściastych by bardziej odpowiadały występującym w Polsce różnorodnym pod względem gatunkowym i wiekowym drzewostanom tego typu.
12. Zmiana rozdzielczości czasowych danych prędkości wiatru z godzinnych na dobowe zmienia przebieg pożaru w sposób indywidualny, zależny od aktualnego ułożenia paliw o różnej palności i przeszkód terenowych
13. Obszary zawierające duży procent drzew iglastych są bardziej podatne na ogień i nadchodzące zmiany reżimu pożarowego. Dodatkowo podatność na ogień zwiększa niski wiek drzewostanów. W celu zmniejszenia ryzyka pożarowego należy przebudowywać drzewostan w stronę drzew liściastych i umożliwić drzewom dożywanie późniejszego wieku.
14. W okresie historycznym dominują pożary małe. Jest to spowodowane w dużej mierze wysoką skutecznością systemu przeciwpożarowego.
15. Pożary z zdecydowanej większości przypadków są zaprószone przez człowieka.

16. Człowiek jest jednym z głównych czynników kształtujący reżim pożarowy, zarówno przez zwiększenie częstotliwości zapłonu jak i przez prowadzenie skutecznych akcji gaśniczych.

## 9 . Bibliografia

- Aldersley A., Murray S. J., Cornell S. E.: Global and regional analysis of climate and human drivers of wildfire; *Science of The Total Environment* 409 (2011)
- Bajocco S., Pezzatti G.B., Mazzoleni S., Ricotta C.: Wildfire seasonality and land use: when do wildfires prefer to burn? *Environ Monit Assess* (2010)
- Barlow J., Parry L., Gardner T. A., Ferreira J., Arageo L. E.O.C, Carmenta R., Berenguer E., Vieira I. C.G., Souza C., Cochrane M. A.: The critical importance of considering fire In REDD+ programs; *Biological Conservation* 154 (2012)
- Bodin P., Wiman Bo L.B.; The usefulness of stability concepts in forest management when coping with increasing climate uncertainties; *Forest Ecology and Management* 242 (2007)
- Dury M., Hambuckers A., Warnant P., Henrot A., Favre E., Ouberdous M., Francois L.: Responses of European forest ecosystems to 21<sup>st</sup> century climate: assessing changes in interannual variability and fire intensity; *iForest\_ Biogeoscience and Forestry* (2010), Antalya, Turkey
- Flannigan M.D., Stocks B.J., Wotton B.M.: Climate change and forest fires; *The Science of the Total Environment* 262 (2000)
- Fronczak K.: Leśne Kompleksy promocyjne. Las w dziewiętnastu odsłonach, Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, 2007
- Groisman P.Y., Sherstyukov B.G., Razuvaev V.N., Knight R.W., Enloe J.G., Stroumentova N.S., Whitfield P.H., Forland E., Hannsen-Bauer I., Tuomenvirta H., Aleksandersson H., Mescherskaya A.V., Karl T.R.: Potential forest fire danger over Northern Eurasia: Changes Turing the 20<sup>th</sup> century; *Global and Planetary Change* 56 (2007)
- Hanewinkel M., Peltola H., Soares P., Gonzalez-Olabarria J. R.: Recent approaches to model the risk of storm and fire to European forest and their integration into simulation and decision support tools; *Forest Systems* 2010 19(SI), 30-47
- Hessl A.E.: Pathways for climate effect on fire: Models, data and uncertainties; *Progress in Physical Geography* (2011) 35:393
- Hong S. He, Mladenoff D. J., Gustafson E. J.: Study of Landscape change under forest harvesting and climate warming-induced fire disturbance; *Forest Ecology and Management* 155 (2002)
- Von Hoyningen-Huene W., Schmidt T., Chan A. K., Heintzenberg J., Neusuess C.: Climate-relevant aerosol parameters of South-East Asian forest fire haze; *J. Aerosol Sci.* Vol. 29, Great Britain 1998



Huerta M. A., Whitlock C., Yale J.: Holocene vegetation-fire-climate linkages in northern Yellowstone National Park, USA; *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 271 (2009)

Akihito Ito: Modelling of carbon cycle and fire regime in an east Siberian larch forest; *Ecological Modelling* 187 (2005)

Jokiel B. i Kostrubiec B.: Statystyka z elementami matematyki dla geografów; Państwowe Wydawnictwo Naukowe - Warszawa 1981

Kaczmarowski J.: Pirologia leśna, Przegląd pożarniczy, Wydział Ochrony Lasu Dyrekcji Generalnej Lasów Państwowych, 2016

Kloster S., Mahowald N. M., Randerson J.T., Lawrence P. J.: The impacts of climate, land use, and demography on fires during the 21<sup>st</sup> century simulated by CLM-CN; *Biogeosciences*, 9, 509-525 (2012)

Kodandapani N., Cochrane M.A., Sukumar R.: A comparative analysis of spacial, temporal, and ecological characteristics of forest fires in seasonally dry tropical ecosystems in Western Ghats, India: *Forest Ecology and Management* 256 (2008)

Kozuchowski K., Baliński W., Papiernik Ż. : Extreme atmospheric conditions and forest fires in Poland; The influence of extreme phenomena on the natural environment and human living conditions University of Łódź 2008

Lenihan J. M., Bachelet D., Neilson R. P., Drapek R.: Simulated response of conterminous United States ecosystems to climate change at different levels of fire suppression, CO<sub>2</sub> emission rate, and growth response to CO<sub>2</sub>; *Global and Planetary Change* 64 (2008)

Linstadter A., Zielhofer C.: Regional fire history shows abrupt responses of Mediterranean ecosystems to centennial-scale climate change (Olea-Pistacia Woodlands, NE Morocco); *Journal of Arid Environments* 74 (2010)

Margolis E. Q., Balmat J.: Fire history and fire-climate relationship along a fire regime gradient in the Santa Fe Municipal Watershed, NM, USA; *Forest Ecology and Management* 258 (2009)

Materiały Archiwalne Komendy Powiatowej Państwowej Straży Pożarnej w Brzezinach – dane o pożarach z lat 1989-2013

Materiały Archiwalne Komendy Powiatowej Państwowej Straży Pożarnej w Koluszkach – dane o pożarach z lat 1989-2013

Materiały Archiwalne Komendy Powiatowej Państwowej Straży Pożarnej w Łodzi – dane o pożarach z lat 2002-2013

Materiały Archiwalne Komendy Powiatowej Państwowej Straży Pożarnej w Łowiczu – dane o pożarach z lat 1999-2013

Materiały Archiwalne Komendy Powiatowej Państwowej Straży Pożarnej w Piotrkowie – dane o pożarach z lat 1989-2013

Materiały Archiwalne Komendy Powiatowej Państwowej Straży Pożarnej w Rawie Mazowieckiej – dane o pożarach z lat 1991-1997

Materiały Archiwalne Komendy Powiatowej Państwowej Straży Pożarnej w Skierniewicach – dane o pożarach z lat 1999-2013

Materiały Archiwalne Komendy Powiatowej Państwowej Straży Pożarnej w Tomaszowie Mazowieckim – dane o pożarach z lat 1989 – 2013

Materiały Archiwalne Komendy Powiatowej Państwowej Straży Pożarnej w Zgierzu – dane o pożarach z lat 1991-92, 1994-96, 2000-2012

Lasy Państwowe; <http://spala.lodz.lasy.gov.pl>

Materiały Archiwalne Nadleśnictwa Brzeziny – dane o pożarach z lat 2003-2013

Materiały Archiwalne Nadleśnictwa Spała – dane o pożarach z lat 1987-2013

Materiały Archiwalne Leśnego Zakładu Doświadczalnego w Rogowie – dane o pożarach z lat 1992, 2000-2013

Mapa Podziału Hydrograficznego Polski, Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej, 2013

Matthews S., Sullivan A. L., Watson P., Williams R. J.: Climate change, fuel and fire behavior in a eucalypt forest; *Global Change Biology* (2012) 18, 3212-3223

Nadeau L.B., McRae D.J., Jin J.Z.: Development of National Fuel-Type Map for Canada Using Fuzzy Logic; Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre (2005)

Nitschke C. R., Innes J. L.: Integrating climate change into forest management in South-Central British Columbia: An assessment of landscape vulnerability and development of landscape vulnerability and development of a climate-smart framework; *Forest Ecology and Management* 256 (2008)

Nunes A. N.: Regional variability and driving forces behind forest fires in Portugal an overview of the last three decades (1980-2009); *Applied Geography* 34 (2012)

Olsson F., Gaillard M.J., Lemdahl G., Greisman A., Lanos P., Marguerie D., Marcoux N., Skoglund P., Waglin J.: A continuous record of fire covering the last 10,500 calendar years from southern Sweden – The role of climate and human activities; *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 291 (2010)

Pausas J.G., Paula S.: Fuel shapes the fire-climate relationship: evidence from Mediterranean ecosystems; *Global Ecology and Biogeography* 21 (2012)

Pelletier G., St-Onge J., Bordeleau P., De Rainville P., Bart F., Aubin E., Roy J.F., Therriault G.; Classification of Forest Stands as Fuels According to the Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System. Third ten-year Quebec forest survey program (2009)

Pelletier, J. St-Onge, J. F. Roy, Therriault G., Bordeleau P.: Classification of Forest Stands as Forest Fuels According to the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System, Quebec (2012)

Pereira M.G., Trigo R.M., Da Camara C.C., Pereira J.M.C., Leite S. M.: Synoptic patterns associated with large summer forest fires in Portugal; Agricultural and Forest Meteorology 129 (2005)

Perrakis D. D.B., Fire Science Officer, BC Wildfire Service, Eade G., GeoTech Systems: British Columbia Wildfire Fuel Typing and Fuel Type Layer Description, BC Wildfire Service HQ, Ministry of Forests, Lands, and Natural Resource Operations; Victoria, British Columbia

Podur J., Wotton M.: Will climate change overwhelm fire management capacity?; Ecological modeling 221 (2010)

Prędecka A.: Ogień w lesie a przyroda, Lasy Państwowe, Warszawa 2011

Roman-Cuesta R.M., Gracia M., Retana J.: factors influencing the formation of unburned forest islands within the perimeter of a large forest fire; Forest Ecology and Management 258 (2009)

Roman-Cuesta R. M., Gracia M., Retana J. : Factors influencing the formation of unburned forest Island within the perimeter of a large forest fire, (2009) Forest Ecology and Management 258/2009

Święcicki Z.; Instrukcja Urządzenia Lasu; Państwowe Gospodarstwo Leśne Lasy Państwowe, Warszawa 2012

Tang G., Shafer S.L., Bartlein P.J., Holman J.O.: Effects of experimental protocol on global vegetation model accuracy: A comparison of simulated and observed vegetation patterns for Asia; Ecological Modeling 220 (2009)

Tymstra C., Bryce R., Wotton B.M., Taylor S.W., Armitage O.B.: Development and Structure of Prometheus: The Canadian Wildland Fire Growth Simulation Model; Canadian Forestry Service , Northern Forestry Centre (2010)

Ubysz B., Szczygieł R., Piwnicki J., Kwiatkowski M.: Wpływ pożarów na lasy- Polska (2009)

Valeo C., Beaty K., Hesslein R.: Influence of forest fires on climate change studies in the central boreal forest of Canada; Journal of Hydrology 280 (2003)

Van Wagner C.E.: Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System; Petawawa National Forestry Institute, Chalk River, Ontario (1987)

Van der Werf G. R., Randerson J. T., Giglio L., Van Leeuwen T.T., Yang Chen, Rogers B. M., Mingquan Mu, Van Marle M. J. E., Morton D. C., Collatz G. J., Yokelson R. J., and Kasibhatla P. S., Global fire emissions estimates during 1997–2016; Earth System Science Data (2017)

C. Whitlock, S. L. Shafer, J. Marlon: The role of climate and vegetation change in shaping past and future fire regimes in the northwestern US and the implications for ecosystem management; Forest Ecology and Management 178 (2003)

Wibig J.: Współczesne zmiany klimatyczne – przesłanki wpływu czynników antropogenicznych, (2009)

Baza Danych Topograficznych BDOT10k, Departament Geodezji i Kartografii Urzędu Marszałkowskiego Województwa Łódzkiego

Centralny Zasób Geodezyjno i Kartograficzny Urzędu Geodezji i Kartografii

FBP Fuel Type Descriptions; Canadian Wildland Fire Information System

Dane meteorologiczne Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, serie z lat 1989 -2013.

Otwarta Encyklopedia Leśna <http://www.encyklopedia.lasypolskie.pl>

Prometheus Data I/O Standards Manual, Version 5.2, CWFGM Data I/O Standards Technical Sub-Committee 2009

Prometheus the Canadian Wildland Fire Growth Simulation Model; User Manual, 2009

Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie z 10 września 1998 r.

Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji w sprawie szczegółowych zasad organizacji krajowego systemu ratowniczo-gaśniczego (Dz. U. z 1999 nr 111 poz. 1311)

Zasoby cyfrowe Leśnego Zakładu Doświadczalnego w Rogowie; Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Zasoby cyfrowe Wydziału Zarządzania Zasobami Leśnymi Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Łodzi

## **Załącznik nr 1.**

### **Pożary leśne 1989-2013 oraz wyniki symulacji dla pożarów historycznych**

#### Oznaczenia:

Id – identyfikator pożaru

Data początek – data początku pożaru

Godzina początek – godzina początku pożaru

Czas trwania – czas trwania pożaru

Powierzchnia rzeczywista [ha] – całkowita powierzchnia spalona w pożarze w ha

Powierzchnia sym. dla 2 h – powierzchnia spalona pożaru uzyskana w dwugodzinnej symulacji w ha

Powierzchnia sym. dla czasu pożaru - powierzchnia spalona pożaru w ha uzyskana w symulacji w czasie odpowiadającym długości pożaru (w zaokrągleniu do 20 min)

Powierzchnia sym. dla 72 h – powierzchnia spalona pożaru uzyskana w trzydniowej symulacji w ha

Max klasa FI kW/m – maksymalna klasa intensywności pożaru (Fire Intensity) w kW/m

Max klasa ROS m/min – maksymalna klasa prędkości rozprzestrzeniania się pożaru (Rate of spread) w m/min

Zgodność przedziału T/N – zgodność przedziału wielkości pożaru rzeczywistego do przedziału wielkości pożaru uzyskanego dla czasu trwania pożaru; T- zgodność, N- brak zgodności

## **Załącznik nr 2.**

### **Wyniki 100 prób, dla kalibracji źródła zapłonu w różnych typach paliwa**

#### Oznaczenia:

Lp – liczba początkowa

Rok – wylosowany rok pożaru

Miesiąc – wylosowany miesiąc pożaru

Dzień – wylosowany dzień pożaru

Godzina – wylosowana godzina pożaru

C-3 – typ paliwa iglastego C-3

C-4 – typ paliwa iglastego C-4

C-5 – typ paliwa iglastego C-5

C-7 – typ paliwa iglastego C-7

D-1/2 – typ paliwa liściastego D, odmiana bez liści 1 i z liśćmi 2

M-1/2 – typ paliwa mieszanego M, odmiana bez liści 1 i z liśćmi 2

O-1a/b – typ paliwa trawiastego O-1, odmiana sucha trawa po roztopach zimowych -a i trawa w okresie wegetacyjnym –b

S-1 – typ paliwa obszarów po wycince S-1

P- wystąpienie pożaru

N – brak pożaru

### **Załącznik nr 3.**

#### **Wyniki symulacji dla historycznego okresu próbnego 2001-2010 oraz scenariuszy historycznych dla okresu 2091-210**

##### Oznaczenia:

Id – identyfikator pożaru według załącznika nr 1

Miesiąc – miesiąc rozpoczęcia pożaru

Dzień – dzień rozpoczęcia pożaru

Godzina- rodzina rozpoczęcia pożaru

Rok – rok pożaru dla próbnego okresu historycznego

Pow 2h – powierzchnia spalona po 2 godzinach pożaru dla próbnego okresu historycznego [ha]

Pow 3 dzień- powierzchnia spalona po 3 dniach pożaru dla próbnego okresu historycznego

Rok RCP 4.5 - rok pożaru dla scenariusza RCP 4.5

Pow 2h [ha] RCP 4.5– powierzchnia spalona po 2 godzinach pożaru dla scenariusza RCP 4.5 w [ha]

Pow 3 dzień [ha] RCP 4.5 - powierzchnia spalona po 3 dniach pożaru dla scenariusza RCP 4.5w [ha]

Rok RCP 8.5- rok pożaru dla scenariusza RCP 8.5

Pow 2h [ha] RCP 8.5- powierzchnia spalona po 2 godzinach pożaru dla scenariusza RCP 8.5 w [ha]

Pow 3 dzień [ha] RCP 8.5- powierzchnia spalona po 3 dniach pożaru dla scenariusza RCP 8.5 w [ha]